

# Zuverlässigkeit des Verpressens von Spannkämen unter Berücksichtigung der Unsicherheiten auf der Baustelle

Kurztitel:  
Zuverlässigkeit Verpressen

Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben

von

Prof. Dr.-Ing. F. S. Rostásy  
Dipl.-Ing. A.-W. Gutsch

Das Vorhaben wurde seit Ende 1992 vom Deutschen Ausschuss für Stahlbeton unter der Nummer V 343 gefördert.

Beratergruppe: Schäfer, Schießl, Steinle, Stiller, Wölfel

April 1996

## Inhaltverzeichnis

0	Bezeichnungen	0
1	Einleitung	1
2	Elemente des Verpressens von Spanngliedern	5
2.1	Allgemeines	5
2.2	Mörtel	5
2.2.1	Grundanforderungen	5
2.2.2	Ausgangsstoffe	6
2.2.2.1	Zemente	6
2.2.2.2	Wassorzementwert	8
2.2.2.3	Zusatzmittel	8
2.2.2.4	Zusatzstoffe	10
2.2.2.4.1	Mikrosilika (MS)	10
2.2.2.4.2	Kunststoffdispersion (Ku)	10
2.3	Maschinentechnik	11
2.4	Mischverfahren	11
2.4.1	Vorbemerkung	11
2.4.2	Handmischer	12
2.4.3	Kolloidalmischer für Feinstzemente	13
2.4.4	Baustellenmischer mit Misch-Quirl	13
2.4.4.1	Niedertouriges Mischwerkzeug	14
2.4.4.2	Hochtouriges Mischwerkzeug	15
2.4.5	Kolloidalmischer	16
2.5	Hüllrohre	17
2.5.1	Allgemeines	17
2.5.2	Belastbarkeit	17
2.5.3	Dichtheit	18
2.5.4	Profilierung	19
2.5.5	Verbindungssteile	20
2.5.6	Kunststoffhüllrohre	20
2.6	Konstruktion	21
2.6.1	Allgemeines	21
2.6.2	Rohrhydraulik	21
2.6.3	Umlenkstellen	22
2.6.4	Spanngliedführung und -neigung	22

2.6.5	Füllungsgrad der Hüllrohres	24
2.6.6	Ein- und Austrittsöffnungen	26
2.6.7	Verengungen	27
2.6.8	Aufweitungen	27
2.7	Verpressarbeit	28
2.7.1	Allgemeines	28
2.7.2	Dichtheit	28
2.7.3	Durchgängigkeit	29
2.7.4	Einpreßgeschwindigkeit	29
2.7.5	Einpreßdruck	30
2.7.6	Nachverpressen	31
2.7.7	Vakuumverfahren	33
2.7.8	Temperatur während des Verpressens	34
2.7.8.1	Allgemeines	34
2.7.8.1	Hohe Temperaturen	35
2.7.8.2	Tiefe Temperaturen	35
2.8	Zusammenfassung und offene Fragen	36
3	Mörtelversuche - Stoffe, Anforderungen, Prüfungen	37
3.1	Ziele der Mörtelversuche	37
3.2	Auswahl der Ausgangsstoffe	37
3.3	Versuchsumfang	38
3.4	Mörtelprüfung	40
3.4.1	Stand der Mörtelprüfung nach Norm	40
3.4.2	Fließfähigkeit - Prüfverfahren und Anforderungen	41
3.4.3	Volumenänderung und Wasserabsondern - Prüfverfahren und Anforderungen	44
3.4.3.1	Auswahl der Prüfverfahren für Wasserabsondern und Volumenänderung	45
3.4.3.2	Versuchsdurchführung zur Bestimmung von Wasserabsondern und Volumenänderung	47
3.4.4	Druckfestigkeit - Prüfverfahren und Anforderung	48
3.5	Weitere Laborversuche	49
3.5.1	Rotationsviskosimeter	49
3.5.2	Porosimetrieuntersuchung	50
3.5.3	Filterpresse	50
3.5.3.1	Untersuchungsrelevanz	50
3.5.3.2	Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung	50
3.5.4	Wasserabsondern unter erhöhtem Druck	51
3.5.4.1	Versuchsaufbau und Versuchsbeschreibung	52
3.6	Mikrozement	52

3.6.1	Erkenntnisstand und Zielstellung	52
3.6.2	Auswahl und Durchführung der Versuche	53
4	Ergebnisse der Mörtelversuche	54
4.1	Überblick	54
4.2	Ergebnisse der Mörtelprüfungen der Standardrezeptur	54
4.2.1	Ergebnisse zur Fließfähigkeit	54
4.2.2	Ergebnisse zur Volumenänderung	55
4.2.3	Ergebnisse zum Wasserabsondern	56
4.2.4	Wasserabsondern unter erhöhtem Druck	57
4.2.5	Zeitlicher Verlauf von Volumenänderung und Wasserabsondern	57
4.2.6	Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung	59
4.3	Ergebnisse der chemisch-physikalischen Zementuntersuchungen	59
4.3.1	Überblick	59
4.3.2	Ergebnisse der chemischen Analysen	59
4.3.3	Zusammenhang zwischen Zement- und Mörtелеigenschaften	62
4.3.3.1	Einfluß von C3A-Gehalt und C3A-Reaktivität	62
4.3.3.2	Einfluß des SO <sub>3</sub> -Gehaltes	65
4.3.3.3	Einfluß des Alkaligehaltes	68
4.3.3.4	Einfluß von C <sub>2</sub> S-, C <sub>3</sub> S- und C <sub>4</sub> AF-Gehalt	71
4.3.4	Zusammenhang zwischen Wasseranspruch und Tauchzeit	73
4.3.5	Zusammenhang zwischen Hydratationswärmeentwicklung und Tauchzeit	74
4.3.6	Lasergranulometrische Untersuchung von Zementen	74
4.3.7	Lasergranulometrische Untersuchung von Zementleim	75
4.3.8	Vergleich der spezifischen Oberflächen	76
4.3.9	Vergleich der Kornverteilungen unterschiedlicher Zemente	78
4.3.10	Einfluß der Kornverteilung auf die Fließfähigkeit	78
4.4	Mörtelmodifikation durch Zugabe von FM, MS oder Kunststoffdispersion	79
4.4.1	Überblick	79
4.4.2	Ergebnisse der Mörtelversuche mit FM-Zusatz	79
4.4.3	Ergebnisse der Mörtelversuche mit Kunststoffdispersion	82
4.4.4	Ergebnisse der Mörtelversuche mit MS-Zusatz	86
4.4.4.1	Fließfähigkeit	86
4.4.4.2	Wasserabsondern	87
4.5	Einfluß hoher und tiefer Temperaturen	88
4.5.1	Allgemeines	88
4.5.2	Fließfähigkeit	89
4.5.3	Volumenänderung	92
4.5.4	Wasserabsondern	94



4.6	Versuchsergebnisse mit Mikrozement	95
4.7	Weitere Laborversuche	95
4.7.1	Ergebnisse der Porosimetrie-Untersuchungen	95
4.7.2	Ergebnisse der Filterpressenversuche	96
4.8	Erfahrungen mit den Mischern	98
4.8.1	Handmischer	98
4.8.2	Kolloidalmischer	98
4.8.3	Hinweise zur Mischergestaltung	99
4.9	Zusammenfassung	100
5	Erfahrungen mit den Prüfverfahren	103
5.1	Allgemeines	103
5.2	Erfahrungen mit den Prüfverfahren zur Fließfähigkeit	103
5.3	Vergleich von Tauchgerät und 10 mm-Trichter	105
5.4	Erfahrungen mit den Prüfverfahren zu Volumenänderung und Wasserabsondern	111
5.5	Empfehlung zur Bestimmung von Fließfähigkeit, Volumenänderung und Wasserabsondern	112
6	Verpressversuche	114
6.1	Ziel der Verpreßversuche	114
6.2	Druck-Durchflußmesser	114
6.3	Verpreßversuche mit Modellrohren mit einem Hochpunkt	116
6.3.1	Ziele der Verpreßversuche mit Modellrohren mit einem Hochpunkt	116
6.3.2	Versuchsbeschreibung	117
6.3.3	Verpreßversuche mit Newton'scher Flüssigkeit	119
6.4	Verpreßversuche an Spanngliedern	120
6.4.1	Ziel der Verpreßversuche an Spanngliedern	120
6.4.2	Messungen während der Verpreßarbeit an Brückenneubauten	121
6.4.3	Verpreßversuch mit einem Draht-Spannverfahren in einem Verpreßstand	124
6.4.3.1	Versuchsaufbau	124
6.4.3.2	Öffnungen	125
7	Ergebnisse der Verpressversuche	126
7.1	Überblick	126
7.2	Ergebnisse der Verpreßversuche mit Modellrohren	126
7.2.1	Zur Ausbildung der Mörtelfront	126
7.2.2	Ergebnisse der Verpreßversuche mit Newton'scher Flüssigkeit	128
7.2.3	Ergebnisse der Verpreßversuche mit Zementmörtel	129

7.2.4	Wasserabsondern und Volumenänderung	130
7.2.4.1	Folgerungen zur Volumenänderung und zum Wasserabsondern	131
7.3	Ergebnisse der Verpreßversuche von Spannglieder in Brücken	132
7.3.1	Druck, Volumen und Fließgeschwindigkeit	132
7.3.2	Volumenbilanz	134
7.3.3	Druckverlust	135
7.3.4	Weitere Erfahrungen und Empfehlungen für die Verpreßvorgänge	136
7.4	Ergebnisse des Verpreßversuchs mit einem Draht-Spannverfahren	137
7.4.1	Ergebnisse während des Verpreßvorgangs	137
7.4.2	Überprüfung des Verpresserfolg am zersägten Spannglied	140
7.4.2.1	Überblick	140
7.4.2.2	Nicht vorgespannter Abschnitt	140
7.4.2.3	Vorgespannter Abschnitt	141
7.4.2.4	Koppelanker	142
7.4.2.5	Linke Endverankerung	142
7.5	Verpreßarbeiten im Rahmen einer Spanngliedsanierung	143
7.5.1	Allgemeines	143
7.5.2	Kunststoffmodifizierter Einpreßmörtel	143
7.5.3	Extreme Temperaturen	144
7.5.4	Vakuummessung	145
7.6	Verpreßversuch mit Mikrozement	146
7.7	Zusammenfassung und Empfehlungen für die Verpreßarbeit	147
8	Anwendung der Strömungsmechanik auf das Verpressen von Spanngliedern	149
8.1	Ziel	149
8.2	Strömungsmechanische Grundlagen	149
8.2.1	Eigenschaften von Flüssigkeiten	149
8.2.2	Rohrströmung	151
8.3	Bestimmung materialspezifischer Fließparameter aus Verpreßversuchen	154
8.4	Bestimmung der scheinbaren Viskosität auf Basis der Verpreßversuche und der Tauchzeit	158
8.5	Hydraulisch wirksamer Durchmesser von Spanngliedern	159
8.6	Druckverlust	162
8.7	Zusammenfassung	163
9	Zusammenfassung	165
10	Literatur	168

## 0 BEZEICHNUNGEN

$A$	[mm <sup>2</sup> , cm <sup>2</sup> ]	Fließquerschnitt bei Kreisrohr
$A_h$	[mm <sup>2</sup> , cm <sup>2</sup> ]	lichter Hüllrohrquerschnitt
$A_p$	[mm <sup>2</sup> , cm <sup>2</sup> ]	Spannstahlquerschnitt
$A_{FI}$	[mm <sup>2</sup> , cm <sup>2</sup> ]	freier Fließquerschnitt ( $A_{FI} = A_h - A_p$ )
$a$	[-]	Formfaktor für die Funktion der scheinbaren Viskosität in Abhängigkeit von der Fließgeschwindigkeit
$d_a$	[cm, m]	Rohraußendurchmesser
$d_h$	[cm, m]	Hüllrohrdurchmesser
$d_i$	[cm, m]	Rohrinnendurchmesser
$d_s$	[cm, m]	Spannstahldurchmesser
$d_{hy}$	[cm, m]	hydraulischer Durchmesser $d_{hy} = 4 A / U$
$d'_{hy}$	[cm, m]	hydraulischer Durchmesser bei einem Spannstahlbündel im Hüllrohr $d'_{hy} = 4 A / U'$
$t$	[h]	Zeit, Mörtelalter
$t_{Ta}$	[sec]	Tauchzeit
$t_{Ta(30)}$	[sec]	Tauchzeit nach 30 Minuten
$t_{Ta(60)}$	[sec]	Tauchzeit nach 60 Minuten
$t_{Tr}$	[sec]	Auslaufzeit (10 mm-Trichter)
$t_{Tr(30)}$	[sec]	Aulaufzeit nach 30 Minuten (10 mm-Trichter)
$t_{Tr(60)}$	[sec]	Aulaufzeit nach 60 Minuten (10 mm-Trichter)
$t_{MT}$	[sec]	Auslaufzeit Marsh-Trichter (4,76 mm-Auslaufdüse)
$t_{12,7}$	[sec]	Auslaufzeit (12,7 mm Auslaufdüse)
$k_u$	[-]	Verhältnis von $U'/U$
$p$	[bar]	Druck
$p_{Anfang}$	[bar]	Druck am Anfang des Verpreßvorgangs
$p_{Ende}$	[bar]	Druck am Ende des Verpreßvorgangs
$Q$	[l]	Durchflußmenge
$\dot{Q} = q$	[l/min]	Durchflußrate
$V$	[l]	Volumen
$v$	[m/s]	Fließgeschwindigkeit, mittlere Fließgeschwindigkeit im Rohr
$v_{Spalt}$	[m/s]	Fließgeschwindigkeit im Ringspalt des Tauchgerätes

$v_{\text{Düse}}$	[m/s]	Fließgeschwindigkeit in der Düse des 10 mm-Trichters
$l$	[m]	Länge
$O_{\text{spez.}}$	[cm <sup>2</sup> /g]	spezifische Kornoberfläche nach Blaine
$d_{\text{hy}}$	[cm, m]	hydraulischer Durchmesser
$x_{50}$	[μm]	Korndurchmesser bei 50 % Siebdurchgang in der Summenkurve
$S_{\text{m}}(\text{naß})$	[cm <sup>2</sup> /g]	spezifische Kornoberfläche aus Korngrößenverteilung, Lasergranulometer mit Naßdispergierung
$S_{\text{m}}(\text{trocken})$	[cm <sup>2</sup> /g]	spezifische Kornoberfläche aus Korngrößenverteilung, Lasergranulometer mit Trockendispergierung
$U$	[cm, m]	benetzter Umfang
$V$	[l, dm <sup>3</sup> ]	Volumen
$V_{\text{Auslauf}}$	[l, dm <sup>3</sup> ]	Aufgefangenes Volumen im Eimer
$V_{\text{Durchfl.}}$	[l, dm <sup>3</sup> ]	Durchflußvolumen gemessen mit dem Durchflußmesser
$\eta$	[mPa s]	dynamische Viskosität
$\eta'$	[mPa s]	scheinbare Viskosität
$\nu$	[m <sup>2</sup> /s]	kinematische Viskosität
$\tau$	[N/m <sup>2</sup> ]	Schubspannung
$\tau_f$	[N/m <sup>2</sup> ]	Fließgrenze
$\dot{\gamma}$	[1/s]	Schergeschwindigkeit
$\rho$	[kg/dm <sup>3</sup> ]	Dichte

Die fehlerfreie Injektion des Hüllrohres eines Spannglieds mit Zementmörtel ist unabdingbar für die Tragfähigkeit, Funktionstüchtigkeit und Dauerhaftigkeit des Spannbetons mit nachträglichem Verbund. Zum einen bietet der alkalische Zementmörtel einen dauerhaften, aktiven Korrosionsschutz des Spannstahls. Zum anderen stellt er die Verbundankoppelung zwischen Spannstahl und Bauwerksbeton her.

Auch wenn das Wissen um die Bedeutung einer mangelhaften Verpressung gewachsen ist, so deckt die Zustandsuntersuchung bestehender Bauwerke immer wieder Verpreßmängel auf. Häufig stehen mangelhaft verpreßte Hüllrohre mit der Korrosion des Spannstahls in Verbindung. Dieses trifft insbesondere dann zu, wenn die Zutrittsmöglichkeit für stahlaggressive Stoffe gegeben ist. Über die Schadensfälle ist in [16], [17], [48], [49], [58], [64], [69], [71], [83], [87], [88], [89], [90], [91] berichtet.

Die Verpreßmängel besitzen viele Ursachen. Sie können - in Stichworten angegebenen- folgenden Bereichen zugeordnet werden:

- Planungsfehler
  - Mängel in Führung und Anordnung der Spannglieder
  - Unsachgemäße Anordnung von Ein- und Auslauföffnungen
- Ausführungsfehler
  - nicht durchgängige Hüllrohre infolge von Hüllrohrbeschädigungen und Verstopfern
  - Restwasser im Hüllrohr
  - zu große Einpreßgeschwindigkeit
  - unzureichende Kenntnis der Ausführenden
- Fehler bei der Mörtelzusammensetzung
  - ungeeignete Mörtel Eigenschaften (Fließfähigkeit, Wasserabsondern, zu schnelles Ansteifen)
  - ungünstige chemisch-physikalische Eigenschaften des Zementes
- unzureichende Kontrollen während der Ausführung
  - fehlende Kontrolle des Verpreßvolumens
- ungünstige Ausführungsbedingungen
- neuere Entwicklungen im Spannbetonbau (z.B. längere Spannglieder mit größeren Vorspannkräften)

In Großbritannien haben Korrosionsschäden am Spannstahl dazu geführt, daß das Dept. of Transport 1992 die Ausführung von Spannbetonbrücken mit nachträglichem Verbund für die unmittelbare Zukunft untersagt hat. Zur Überprüfung der Wirksamkeit der Hüllrohrinjektion hinsichtlich Dauerhaftigkeit wurden Arbeitsgruppen gebildet [72]. Diese bekamen die Aufgabe, Vorschläge zur Verbesserung auszuarbeiten. In ersten Ergebnissen dieser Arbeitsgruppen werden konkrete Anforderungen an Einpreßmörtel, Maschinenteknik, Konstruktion und Arbeitsweisen vorgestellt [73], [93].

Die bisherigen Kenntnisse über das Verpressen stützen sich auf umfangreiche Mörtel- und Verpreßversuche an Spanngliedern sowie auf vielfältigen Erfahrungen. Die Mörtel Eigenschaften und deren Verbesserung waren immer wieder Gegenstand von Forschungsarbeiten [4], [5], [7], [24], [41], [45], [51], [58], [61], [62], [78], [86], [100]. Dennoch stellt der Mörtel nach wie vor einen großen Unsicherheitsfaktor beim Verpressen von Spanngliedern dar. Dieses beruht zum einen darauf, daß der Mörtel unter den oft widrigen Bedingungen auf Baustellen hergestellt werden muß. Zum anderen hängen die Mörtel Eigenschaften stark von den chemisch-physikalischen Zementeigenschaften und den diese beeinflussenden Umweltbedingungen ab [24]. Die gezielte Mörtelmodifikation durch Zugabe von Kunststoffdispersionen, Mikro-Silika oder Fließmittel ist derzeit nicht gestattet, obwohl deren günstiger Einfluß auf die Mörtel Eigenschaften vielfach gezeigt worden ist [7], [43], [51], [78], [86].

Durch Verpreßversuche an Spanngliedern ist in der Vergangenheit die Güte der Spanngliedinjektion eingehend untersucht worden. Die Versuche wurden teilweise aufgrund geänderter Anforderungen (größere und längere Spannglieder) oder im Rahmen von Zulassungsverfahren notwendig [41], [67], [76], [77], [79], [101]. Anhand der Versuche konnten u.a. allgemeingültige Empfehlungen bezüglich Konstruktion und Arbeitsweisen gegeben werden [33], [34], [37], [52], [73]. In Deutschland werden in den Zulassungen z.T. allgemeingültige Hinweise für das Verpressen gegeben [34]. Die bisher gesammelten Erfahrungen und Erkenntnisse zum Verpressen von Spanngliedern flossen in FIP-Empfehlungen [36] und Normenentwürfen [29], [30], [31] ein. Ein deutlicher Schritt in Richtung auf ein zuverlässigeres Verpressen von Spanngliedern wurde getan.

In den letzten Jahren wurden weitere Bemühungen unternommen, den Korrosionsschutz des Spannstahls durch den Einsatz neuer Materialien zu verbessern. Dazu gehört die Verwendung von Kunststoffhüllrohren und besonders dichter Einpreßmörtel [43], [66], [73], [97], [101]. Obwohl die Verbesserung des Korrosionsschutzes durch Kunststoffhüllrohre immer wieder herausgestellt wurde, ist deren Verwendung erst in den Anfängen.

Da beim Verpressen von Spanngliedern auch unter Berücksichtigung der bisherigen Kenntnis immer noch Unsicherheiten zurückbleiben, sollten im Rahmen der Forschungsarbeit weitere Verbesserungsvorschläge erarbeitet werden. Diese sollten umfassen:

- Erprobung und Weiterentwicklung von Zementmörtel mit verbesserten physikalisch-chemischen und technologischen Eigenschaften,
- Zusammenstellung von chemisch-physikalischen Auswahlkriterien für Zemente,
- Vergleich der derzeitigen Methoden zur Mörtelherstellung sowie die Erarbeitung von Verbesserungsvorschlägen,
- Vergleich von baustellengeeigneten Prüfverfahren für Einpreßmörtel sowie deren Aussagekraft unter Baustellenbedingungen,
- Aufzeigen von Möglichkeiten zur besseren Kontrolle des Verpreßvorgangs durch neue Meßverfahren,
- Prüfung der Anwendbarkeit dieser Meßverfahren während der Verpreßarbeiten unter Baustellenbedingungen,
- Kriterien zum Abschätzen der Verpreßbarkeit von Spanngliedern in Abhängigkeit der Randbedingungen

In einem kurzen Überblick werden in Kap. 2 zunächst die wichtigsten Elemente des Verpressens sowie der bisherige Kenntnisstand zusammengefaßt. Ergänzend sei auf den Zwischenbericht verwiesen [80].

In Kap. 3 werden die im Rahmen der Forschungsarbeit durchgeführten Zement- und Mörtelversuche beschrieben. Neben den Mörtelversuchen hatte die chemisch-physikalische Zementuntersuchung besondere Bedeutung, da versucht werden sollte, einen Zusammenhang zwischen den Zement- und den Mörtel Eigenschaften herzustellen. Die Ergebnisse der Zement- und Mörtelversuche werden im Kap. 4 dargestellt.

Bei der Auswahl der Prüfverfahren für Einpreßmörtel standen baustellengerechte Prüfverfahren im Vordergrund. Auch im Hinblick auf die europäische Normung sollten die Prüfverfahren hinsichtlich Handhabung und Aussagefähigkeit verglichen werden, Kap. 5.

In Kap. 6 werden die Verpreßversuche an Modellrohren und an realen Spanngliedern vorgestellt. Die Versuche dienten dazu, die Fließbedingungen im Rohr eingehend zu studieren und gleichzeitig die Anwendbarkeit neuer Meßtechnik zur Überprüfung von Verpreßarbeiten zu prüfen. Bei der Meßtechnik handelt es sich um eine Druck-Durchflußmessung während des

Verpreßvorgangs, die gleichfalls online eine Volumenbilanz ermöglicht. Kap. 7 enthält die Ergebnisse der Verpreßversuche.

Das Kap. 8 beschäftigt sich zunächst mit Grundlagen der Strömungsmechanik im Hinblick auf die Verhältnisse im Hüllrohr. Aufbauend auf die Ergebnisse der Verpreßversuche wird ein Planungswerkzeug entwickelt, mit dem die Verpreßbarkeit anhand von Eignungsversuchen, Spanngliedgeometrie und Arbeitsweise abgeschätzt werden kann.



## 2 ELEMENTE DES VERPRESSENS VON SPANNGLIEDERN

### 2.1 Allgemeines

Das Verpressen von Spanngliedern hängt von zahlreichen Elementen ab, die sich teilweise untereinander beeinflussen. Bild 2.1 gibt einen Überblick über die Elemente des Verpressens und deren Verknüpfungen. Auf sie wird im folgenden eingegangen. Der Kenntnisstand wird umrissen, s. [80].

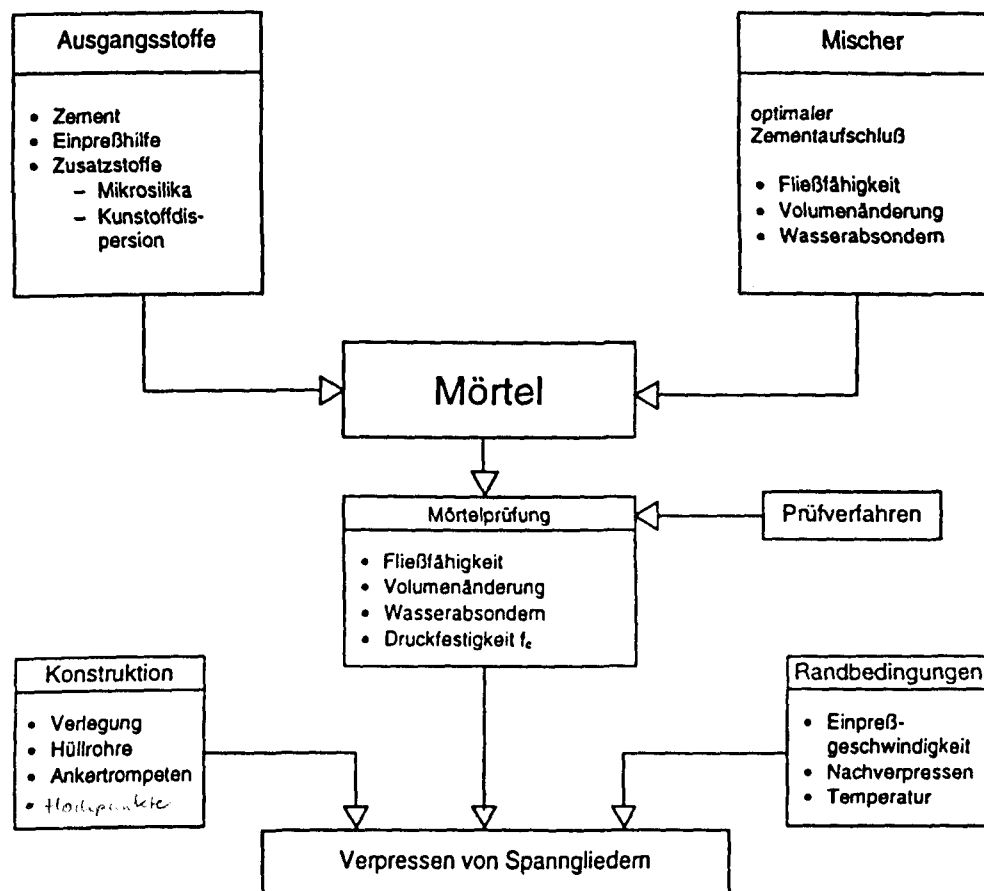


Bild 2.1: Bestandteile für das Verpressen von Spanngliedern mit nachträglichem Verbund

### 2.2 Mörtel

#### 2.2.1 Grundanforderungen

In Anbetracht der Aufgaben, die Injektionsmörtel zu erfüllen hat, kommt seiner Eignung besondere Bedeutung zu. An seine Eigenschaften werden bestimmte Anforderungen gerichtet. Die Mörtel Eigenschaften werden mit unterschiedlichen Verfahren nach Norm (DIN 4227, T. 5,

bzw. prEN 445 und 447) geprüft [21], [29], [30], [31]. Folgende Faktoren wirken sich auf die Mörtleigenschaften aus:

- Ausgangsstoffe (Zement, W/Z-Wert, Zusatzmittel und -stoffe),
- Mischtechnik, Maschinenteknik beim Einpressen,
- Randbedingungen (Temperatur, Verarbeitungszeit).

Neuere Entwicklungen im Spannbetonbau führen zu höheren Vorspannkräften und längeren Spanngliedern. Der Mörtel muß dadurch im Spannglied über längere Strecken bewegt werden. Die größere Anzahl von Litzen oder Drähten hat größere Hüllrohrdurchmesser zur Folge. Dadurch steigt auch das zu verpressende Volumen an.

Bei einer großen Anzahl von Litzen oder Drähten werden die Fließbedingungen im Hüllrohr komplizierter. Zwischen Litzen bzw. Drähten kann es zum Auspressen von Wasser kommen, zum sogenannten Drainageeffekt [24], [41]. Verstopfer können die Folge sein. Außerdem ist bei größeren Litzen- oder Drahtbündeln die Querläufigkeit des Mörtels zwischen den Litzen oder Drähten behindert. Die einzelnen Spannstähle sind dann ggf. nicht mehr allseitig vom Mörtel ummantelt.

Als Folge der neuen Entwicklungen müssen an den Einpreßmörtel höhere Anforderungen in folgenden Bereichen gestellt werden:

- gutes Fließvermögen über einen längeren Zeitraum,
- keine Entmischungsneigung,
- kein bzw. geringes Wasserabsondern (Bluten) auch bei großen Hüllrohrquerschnitten.

## **2.2.2 Ausgangsstoffe**

### **2.2.2.1 Zemente**

Für das Verpressen von Spanngliedern dürfen nach DIN 4227 T. 5 [21] ausschließlich Portlandzemente PZ 35 F, PZ 45 F und PZ 55 F verwendet werden. In Deutschland wird überwiegend PZ 45 F eingesetzt. Für Spannbetontragwerke nach EC 2, T.1 und T.2 [25], [26] dürfen Portlandzemente CEM I nach ENV 197 [28] verwendet werden. Als Festigkeitsklasse dürfte sich CEM I 42.5 R durchsetzen. Dieser entspricht nach DAfStb-Richtlinie [13] einem PZ 45 F.

Eignungsprüfungen von Einpreßmörteln belegen, daß die Mörtелеigenschaften erheblich vom verwendeten Zement abhängen. Dieses trifft auch dann zu, wenn Zemente gleicher Güteklasse (PZ 45 F), aber unterschiedlicher Hersteller verwendet werden. Fließfähigkeit und Wasserabsondern sind die besonders betroffenen Mörtелеigenschaften. Dieses wurde auch durch Versuche gezeigt [24], [51], [62].

Unterschiede in der Fließfähigkeit zeigen sich sofort nach dem Mischen, aber auch in Steifigkeitsentwicklung während der ersten Stunde. Dadurch wird die Verarbeitungszeit bestimmt. Die unterschiedlichen Frischmörtелеigenschaften sind auf verschiedene Anfangsreaktionen der Zemente zurückzuführen. Die unterschiedlichen Anfangsreaktionen wiederum hängen von den chemisch-mineralogischen Zementeigenschaften ab.

In [29], [62] wird empfohlen, daß der Mörtel nicht zu schnell ansteift. Er sollte auch einige Zeit nach dem Mischen noch eine gute Fließfähigkeit besitzen. Langsam reagierende Portlandzemente sind daher zu bevorzugen [29]. Der  $C_3A$ -Gehalt des Zementes sollte deswegen reduziert werden, bzw. die Reaktivität gesenkt werden [29].

Neben der chemischen Zusammensetzung des Zementes übt auch dessen Mahlfeinheit einen Einfluß auf die Anfangsreaktivität aus. Die Mahlfeinheit wird derzeit über die spezifische Oberfläche nach Blaine klassifiziert [18]. Bei den Zementen PZ 45 F schwankt sie zwischen  $3700 \leq O_{\text{spez.}} \leq 4500 \text{ cm}^2/\text{g}$  [8]. Es ist fraglich, ob die Mahlfeinheit allein eine aussagekräftige Größe ist. Die Korngrößenverteilung scheint aus heutiger Sicht zur Beurteilung der Reaktivität aussagekräftiger [44].

Die Praxis hat im Laufe der Zeit Erfahrungen darüber gesammelt, welche Zemente der jeweiligen Hersteller für das Verpressen von Spanngliedern besonders geeignet sind. Um Schwierigkeiten während der Verpreßarbeiten aus dem Weg zu gehen, wird meist der Zement jenes Herstellers verwendet, mit dem in der Vergangenheit die wenigsten Probleme aufgetreten waren. Geeignete Beurteilungskriterien, die Aussagen über die Brauchbarkeit der jeweiligen Zementlieferung gestatten, existieren nicht, wären jedoch wünschenswert. Das einzige Lieferkriterium ist derzeit die Forderung der DIN 4227, T. 5, daß der Zement am Tag der Verarbeitung nicht älter als drei Wochen sein darf - gerechnet vom Tag der Werkslieferung [21]. Diese Anforderung an die Zemente ist jedoch nicht ausreichend, um die Herstellung von geeigneten Einpreßmörteln sicherzustellen. Die allgemeine Produktion von für das Verpressen ausgewiesenen Zementen ist bislang nicht erfolgt.

### 2.2.2.2 Wasserzementwert

Der W/Z-Wert ist für die Frisch- und Festmörteleigenschaften entscheidend. Er ist nach oben zu begrenzen, um das Wasserabsondern (Bluten) zu minimieren. Gleichzeitig werden dadurch bestimmte Festigkeitsanforderungen a priori sichergestellt. Ist der W/Z-Wert zu hoch, so kann dies an Hochpunkten zu Wasseransammlungen führen. Hohlräume sind die Folge. Der W/Z-Wert kann jedoch nicht beliebig reduziert werden, da sonst das Fließvermögen auch mit EP-Hilfen eingeschränkt wird. Nach DIN 4227 T. 5 [21] muß  $W/Z \leq 0,44$  sein. Dieses entspricht auch der prEN 447 [31]. Ergänzend dazu ist in der ZTV-K 80 [102] festgelegt, daß ein  $W/Z > 0,40$  der Zustimmung des Auftraggebers bedarf. Nach SIA 162 [92] sollte  $0,34 \leq W/Z \leq 0,42$ . Weiterhin wird nach SIA 162 [92] davon ausgegangen, daß die Frostbeständigkeit des Injektionsmörtels bei  $W/Z < 0,40$  gewährleistet ist. Um einen gleichbleibenden W/Z-Wert während der Verpreßarbeiten sicherzustellen, bzw. Fehldosierungen zu vermeiden, empfiehlt DIN 4227, T.5 [21] die Verwendung von Sackzement.

Spannglieder wurden in der Vergangenheit häufig vor dem Verpreßvorgang mit Wasser durchspült, um die Durchgängigkeit zu prüfen und um eventuellen Schmutz auszuspülen (Ausnahmen hiervon enthalten die Zulassungsbescheide). Nach dem Spülen mit Wasser wurden die Spannglieder mit Druckluft ausgeblasen, um das Wasser zu entfernen. Dennoch konnte besonders an Tiefpunkten und in Hüllrohrsicken Restwasser zurückbleiben. Das Restwasser wird durch den Einpreßmörtel zwar verdrängt, an der Mörtelfront kann es jedoch zum Vermischen von Mörtel und Restwasser kommen. Die Folge ist ein undefinierter Anstieg des W/Z-Wertes an der Mörtelfront.

Um Reserven für die Aufnahme von Restwasser zu haben, ohne den zulässigen W/Z-Wert zu überschreiten, sollte der W/Z-Wert möglichst niedrig sein. In [62] wird ein W/Z-Wert kleiner gleich 0,3 vorgeschlagen. Die für das Verpressen notwendige Konsistenz sollte dann durch die Zugabe von Fließmittel eingestellt werden.

### 2.2.2.3 Zusatzmittel

Für die Herstellung von Einpreßmörteln sind gemäß DIN 4227, T. 5 [21] nur Einpreßhilfen zugelassen. Einpreßhilfen bestehen i.w. aus Fließmittel, Quellmittel und Verzögerer. Die jeweiligen Bestandteile sind in der Einpreßhilfe fertig konfektioniert.

Nach der pr EN 447 [31] ist die Verwendung von einzelnen und kombinierten Zusatzmitteln gemäß EN 104.300 [32] gestattet. Werden mehrere Zusatzmittel gleichzeitig verwendet, sind

wechselseitige Beeinflussungen möglich. Der unbedenkliche Einsatz mehrerer Zusatzmittel muß durch Eignungsversuche nachgewiesen werden.

Für die Verarbeitbarkeit des Einpreßmörtels sind die Anteile von Fließmittel und Verzögerer entscheidend. Eignungsversuche mit einer bestimmten Einpreßhilfe und verschiedenen Zementen zeigen, daß die Fließeigenschaften des Frischmörtels sehr unterschiedlich ausfallen. Dieses ist auf die unterschiedliche Reaktivität der Zemente ( $C_3A$ -, Gipsgehalt, Korngrößenverteilung) zurückzuführen. Die z.Z. übliche pauschale Zugabe von Einpreßhilfe ist deswegen fraglich.

Durch die Zugabe von Quellmittel steigt die Porosität des Mörtel an. Eine größere Porosität hat eine Verringerung des chemisch-physikalischen Widerstandes des erhärteten Mörtels zur Folge. Dies ist wegen des Korrosionsschutzes (auch Cl-Eindringung) nicht wünschenswert.

Die Zugabe von Verflüssigern ist grundsätzlich als günstig anzusehen, da das vorhandene Wasser durch Reduktion der Oberflächenspannung optimal genutzt wird. Der Wassergehalt im Mörtel kann reduziert werden. Die Eigenschaften von Verflüssigern (FM) werden erheblich von deren Ausgangsstoffen geprägt. Als Ausgangsstoffe für Fließmittel werden Ligninsulfonate, Melaminharze und Naphthalinsulfate verwendet [15].

Ligninsulfonate haben neben der verflüssigenden Wirkung gleichzeitig eine schwache bis starke Erstarrungsverzögerung zur Folge. Weiterhin begünstigen sie die Luftporenbildung; evt. ist Bluten möglich. Ligninsulfate sind der Hauptwirkstoff der meisten Fließmittel.

Demgegenüber verzögern Melaminharze das Erstarren nicht. Schon bei einer Temperatur von  $T = 20\text{ °C}$  kommt es zum schnellen Ansteifen des Mörtels. Hohe Temperaturen beschleunigen das Ansteifen. Melaminharz hat gleichzeitig eine Klebwirkung. Die Entmischungsneigung nimmt ab. Insgesamt ist eine höhere Dosierung als bei Ligninsulfaten erforderlich.

Naphthalinsulfate bewirken eine geringe Verzögerung des Erstarrens. Bei Überdosierung ist eine plötzliche Entmischung des Mörtels möglich. Im Vergleich zu Melaminharz ist für die gleiche verflüssigende Wirkung eine geringere Dosierung erforderlich.

## 2.2.2.4 Zusatzstoffe

### 2.2.2.4.1 Mikrosilika (MS)

Umfangreiche Versuche [37], [40], [43], [70], [74], [78], [86] belegen, daß sowohl die Frischmörteleigenschaften als auch die Eigenschaften des festen Mörtels durch die Zugabe von Mikrosilika-Staub (Si-Stoff: meist als slurry geliefert und zugegeben) verbessert werden können. Durch die sehr feinen, kugeligen und glasigen Partikel wird im Frischmörtel ein stabileres Fließvermögen erzielt. Gleichzeitig nimmt die Langzeitstabilität des Frischmörtels zu. Die Wasserabsonderung wird geringer.

Im erhärteten Zementstein bewirkt der hohe  $\text{SiO}_2$ -Gehalt des Mikrosilika-Staubes eine bessere Vernetzung der Klinkerphasen. Die Zementsteinstruktur wird verfeinert. Die Kapillarporosität nimmt ab. Das Resultat ist eine größere Dichtigkeit gegenüber aggressiven Medien sowie eine höhere Festigkeit. Durch die Zugabe von Mikrosilika kann bei Einpreßmörteln das Eindringen von Chloriden deutlich reduziert werden [71].

Nach DIN 4227 T. 5 [21] darf dem Einpreßmörtel jedoch nur ein Zusatzstoff zugegeben werden, der nicht latent-hydraulisch reagiert. Nach pr EN 447 [31] ist bei üblichem Einpreßmörtel die Zugabe von Zusatzstoffen ebenso verboten. Lediglich bei besonderen Einpreßmörteln ist die Zugabe von Zusatzstoffen erlaubt. Diese besonderen Mörtel sind jedoch nicht für das Verpressen von Spanngliedern vorgesehen [31].

Der Grund für ein Verbot von latent-hydraulischen Zusatzstoffen für Verpreßmörtel ist offenbar in der Reaktion der Kieselsäure mit dem Calciumhydroxid zu suchen. Für einen guten Korrosionsschutz ist eine ausreichende Menge von  $\text{Ca(OH)}_2$  im Zementstein als alkalischer Puffer erforderlich. Durch die latent-hydraulischen Reaktion des Mikrosilika-Staubes wird  $\text{Ca(OH)}_2$  teilweise verbraucht. Es ist dennoch unwahrscheinlich, daß durch die latent-hydraulische Reaktion die Alkalität des Einpreßmörtels soweit abnimmt, daß der Spannstahl nicht mehr ausreichend passiviert ist. Im übrigen liegt der Spannstahl umgeben von Einpreßmörtel im Bauwerksinneren, so daß der direkte Kontakt mit Luftkohlenensäure ohnehin ausgeschlossen ist.

### 2.2.2.4.2 Kunststoffdispersion (Ku)

Kordina et al. haben Einpreßmörtel für Spannglieder mit nachträglichem Verbund mit einer Kunststoffdispersion modifiziert [51], [52]. Bei der Kunststoffdispersion handelte es sich um eine wässrige Dispersion eines Copolymers aus Butylacrylat und Styrol. Die Dispersion ist zur

Modifikation von mineralischen Bindemitteln auf Zementbasis geeignet. Es begünstigt die Konsistenz und reduziert den Wasseranspruch. Außerdem wird die Langzeitverarbeitbarkeit verbessert. Bei hoher Dosierung der Kunststoffdispersion nahm die Mörteldruckfestigkeit geringfügig ab.

## **2.3 Maschinenteknik**

Für das Verpressen sind ein Mischer und eine Einpreßpumpe erforderlich. In der DIN 4227, T. 5 [21] wird lediglich gefordert, daß Mischer und Einpreßpumpe auf die Erfordernisse des Spannverfahrens abzustimmen seien. In prEN 446 [30] werden demgegenüber detailliertere Anforderungen an diese Maschinen gestellt.

Als Einpreßpumpen werden heute Kolben-, Schnecken- oder Membranpumpen eingesetzt. Spannglieder sind nach DIN 4227, T. 5 [21] ohne Unterbrechung zu verpressen. Auch bei Kolbenpumpen muß ein kontinuierlicher Mörtelstrom gewährleistet sein. Dieser kann durch eine Doppelkolbenpumpe erreicht werden.

Ein diskontinuierlicher Mörtelfluß ist beim Verpressen langer Spannglieder nachteilig. Dennoch wird in [62] davon berichtet, daß beim Verpressen eines 30 m langen Spannglieds eine 8 m lange Mörtelsäule auch nach  $t = 30$  min wieder in Gang gesetzt werden konnte. Es ist zu bezweifeln, daß der Mörtel bei noch längeren Spanngliedern nach einem Stillstand wieder in Gang gesetzt werden kann. Bei einer steifen Mörtelkonsistenz wird es zudem schwieriger, eine stehende Mörtelsäule wieder in Bewegung zu setzen.

Nach [25] sollten alle notwendigen Geräte, wie Mischer und Einpreßpumpe, auf der Baustelle redundant vorhanden sein. Außerdem sollen zur Beseitigung von Verstopfern ständig Druckwasser und Druckluft bereitgehalten werden.

## **2.4 Mischverfahren**

### **2.4.1 Vorbemerkung**

Der Mischprozeß ist für die Mörtel Eigenschaften (Fließfähigkeit, Stabilität) entscheidend [8]. Die Mischintensität bestimmt die Güte des Zementaufschlusses. Ein guter Zementaufschluß ist für die Herstellung eines homogenen Mörtels wichtig.

Im Rahmen der Versuche wurden die heute meist gebräuchlichen Mischer verwendet. Die Mischer unterscheiden sich in erster Linie vom Mischprinzip. Folgende Mischertypen wurden bei den Versuchen eingesetzt:

- Handmischer (Bohrmaschine mit Quirl),
- Kolloidalmischer für Feinstzemente (Handmischer),
- niedertourige Quirl-Mischer (Baustellenmischer älterer Bauart),
- hohtourige Quirl-Mischer (Baustellenmischer),
- Kolloidalmischer (Baustellenmischer).

Die Mischertypen und deren Funktionsweisen werden nachfolgend näher beschrieben. In Kap. 4 wird über die Erfahrungen mit den Mixern im Hinblick auf die Herstellung eines homogenen Mörtels berichtet.

#### 2.4.2 Handmischer

Für die Herstellung kleiner Mischchargen (bis ca. 10 l Mörtel, z.B. bei Sanierungsmaßnahmen) werden oft Handmischer eingesetzt. Diese bestehen aus einer Bohrmaschine o.ä. und einem Mischquirl (Bild 2.2, Einfach- oder Doppelquirl). Als Mischbehälter dienen Eimer oder Kübel.

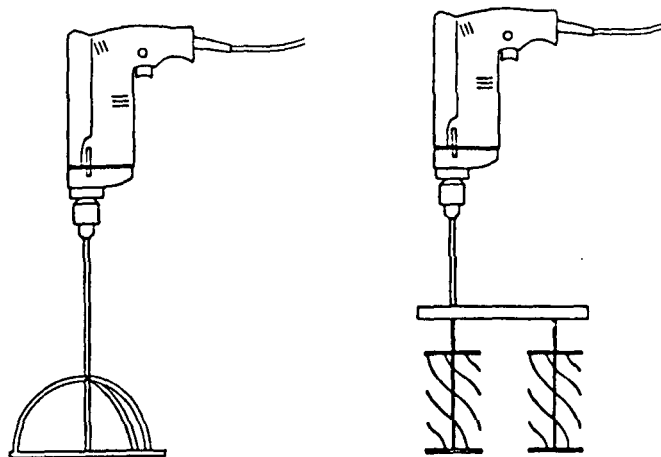


Bild 2.2: Unterschiedliche Quirlformen von Handmischem

Zunächst wird Wasser in den Mischbehälter gegeben. Während das Wasser mit niedriger Drehzahl gequirlt wird, wird Zement zugegeben. Durch langsames Einstreuen des Zementes kann Klumpenbildung vermieden werden. Während der anschließenden 2 - 4 minütigen



Mischphase wird die Mischeinheit (Bohrmaschine mit Quirl) bei höchster Drehzahl ( $> 1.000 \text{ U/min}$ ) betrieben. Dadurch entstehen starke Turbulenzen im Mischbehälter, die eine hohe Scherwirkung haben. Der Zement wird so gut aufgeschlossen.

### 2.4.3 Kolloidalmischer für Feinstzemente

Im Rahmen der Forschungsarbeit wurden probeweise auch Mikrozemente verwendet. Für die Herstellung von Mörteln mit Mikrozementen wird von den Zementherstellern vorgegeben, daß diese mit einem hochtourigen Kolloidalmischer zu mischen sind. Bedingt durch die üblicherweise kleinen Chargen bei Mikrozementen (ca.  $V = 20 \text{ l}$  Mörtelcharge bei Rißinjektion), sind auch die Mischer vergleichsweise klein. Es handelt sich um Handmischer (Bohrmaschine mit angeflanschter Wirbelradpumpe, Bild 2.3).

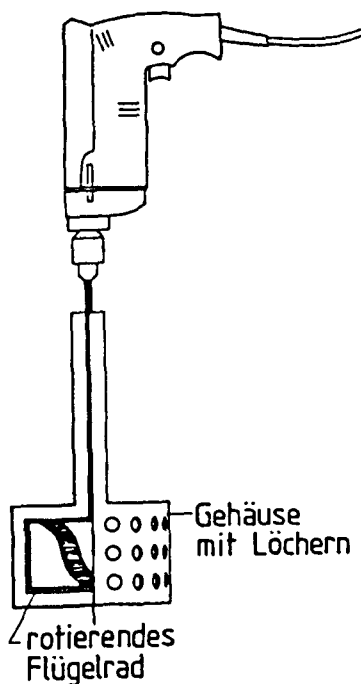


Bild 2.3: Kolloidalmischer für Feinstzemente

### 2.4.4 Baustellenmischer mit Misch-Quirl

Baustellenmischer mit einem Mischquirl lassen sich in Abhängigkeit der Drehzahl des Mischwerkzeuges in

- niedertourige Mischer (Drehzahl 100 - 200 U/min) und
  - hohtourige Mischer (Drehzahl > 1.000 U/min)
- eingruppierten.

#### 2.4.4.1 Niedertouriges Mischwerkzeug

Früher wurden Baustellenmischer mit einem langsam laufenden Rührwerk verwendet (Drehzahl ca. 200 U/min). Bild 2.4 zeigt schematisch den Aufbau eines solchen Mixers mit Vorratsbehälter und Injektionspumpe.

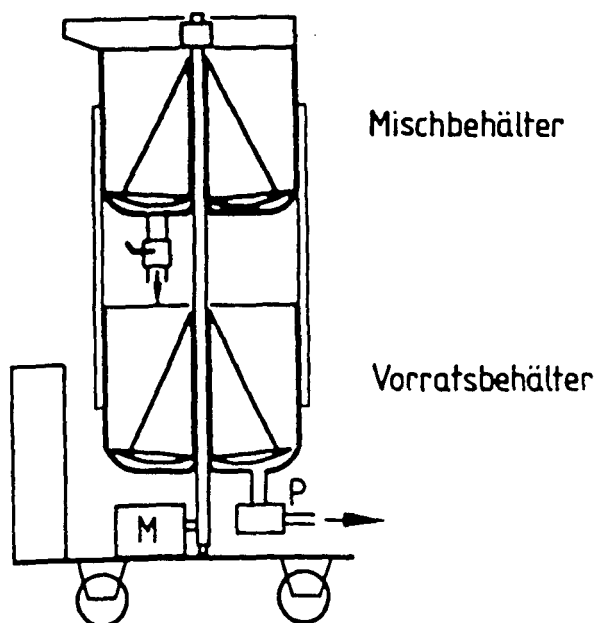


Bild 2.4: Baustellenmischer alter Bauart mit niedrigtourigem Mischwerkzeug

Mit diesen Mixern gelang der Zementaufschluß nicht optimal. Der Mörtel war nicht immer ideal homogenisiert. Nach dem Mischen wurde der Mörtel deswegen durch ein engmaschiges Sieb (Maschenweite 2 mm) gepumpt, um Klumpen im Mörtel zu vermeiden [8].

Bei Mörteln, die mit einem niedertourigen Mischwerk hergestellt werden, ist die Gefahr des Wasserabsonderns durch den vergleichsweise schlechten Zementaufschluß größer als bei sehr homogenen, innig gemischten Mörteln. Die Zementkörner sind bei gutem Zementaufschluß mit einem dünnen Wasserfilm umgeben und dadurch vollständig mit Wasser benetzt (siehe Bild 2.5). Durch van der Waals-Kräfte ist das Wasser bis zum Beginn der Hydratation an den Zementkörnern gebunden. Gelingt ein optimaler Zementaufschluß nicht, befinden sich

zwischen den Zementkörnern größere Wasserlinsen. Dieses Wasser ist bis zum Beginn der Hydratation nicht so fest an den Zementkörnern gebunden. Verstärktes Wasserabsondern ist die Folge.

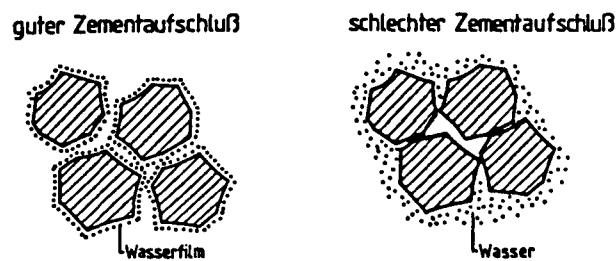


Bild 2.5: Vergleich der Wasseranlagerung an Zementkörner bei gutem und schlechtem Zementaufschluß

#### 2.4.4.2 Hochtouriges Mischwerkzeug

Im Gegensatz zu niedrigtourigen Mixern lassen sich mit hochtourig arbeitenden Mixern sehr homogene Mörtel herstellen. Das Mischwerkzeug hat bei diesen Mixern bezogen auf den Mischbehälter einen viel kleineren Durchmesser. Das Mischwerkzeug besteht aus einem kleinen Flügelrad (Bild 2.6). Das Mischprinzip beruht auch hier darauf, daß sich im Mischbehäl-

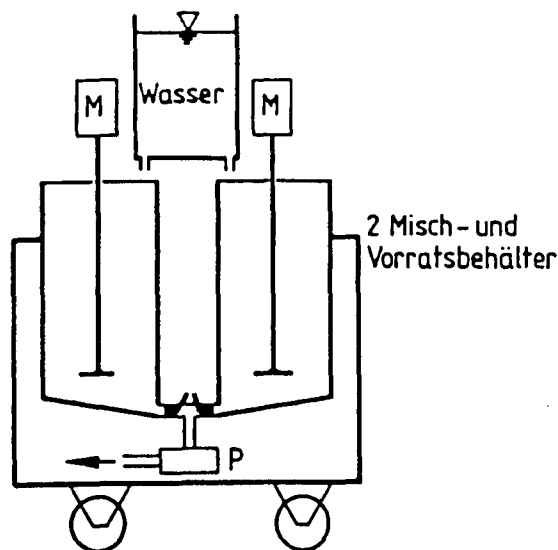


Bild 2.6: Hochtouriger Baustellenmischer

ter starke Turbulenzen ausbilden, welche durch ihre hohen Scherkräfte für einen guten Zementaufschluß sorgen.

#### 2.4.5 Kolloidalmischer

Heute werden für die Mörtelherstellung überwiegend Kolloidalmischer verwendet (Bild 2.7). Diese sind für den Baustelleneinsatz konzipiert (min. Mischcharge mit 50 kg Zement, optimale Mischcharge mit 100 kg Zement).

Das Mischprinzip bei Kolloidalmischern beruht darauf, daß der Mörtel durch eine hocheffiziente Wirbelradpumpe gefördert wird. Das Wirbelrad ist so ausgebildet, daß der Mörtel zwangsläufig durch einen engen Spalt (ca. 5 mm) fließt. Durch das Wirbelrad werden hohe Scherkräfte aufgebracht, die eine intensive Mischung zur Folge haben. Größere Zementklumpen werden

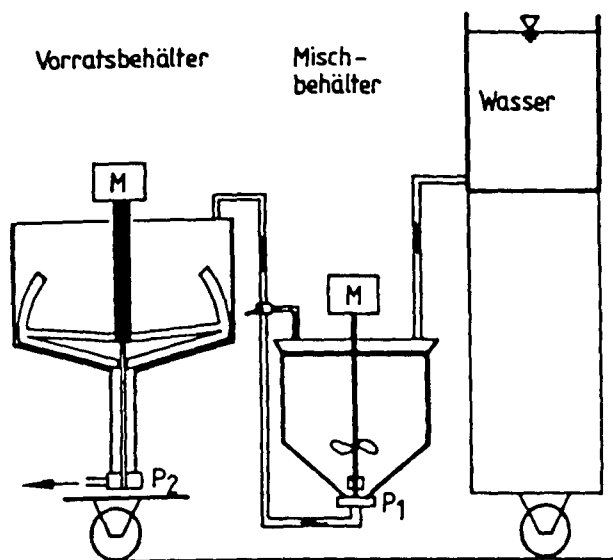


Bild 2.7: Baustellengerechter Kolloidalmischer

beim Durchströmen der Pumpe zwangsläufig zerkleinert. Der Mörtel wird gut homogenisiert. Mörtel, die mit einem Kolloidalmischer hergestellt wurden, dürfen z.T. größere Tauchzeiten haben als jene nach DIN 4227, T. 5, vergl. [1].

## **2.5 Hüllrohre**

### **2.5.1 Allgemeines**

Heute werden bei Spanngliedern mit nachträglichem Verbund fast ausschließlich Stahlhüllrohre verwendet. Diese werden aus Bandstahl entweder mit gefalzter Wendelnaht oder mit geschweißter Längsnaht hergestellt. Die Anforderungen an die Beschaffenheit von Hüllrohren aus Bandstahl für Spannglieder sind in DIN 18553 [22] zusammengestellt. Die Norm gilt für kreisrunde Hüllrohre mit wendelförmiger Profilierung bis zu 100 mm Nennweite. Im Rahmen der europäischen Normung wird diese Norm überarbeitet. 1989 ist ein Entwurf für eine neue DIN 18553 [23] entstanden. An der Einführung auf europäischer Ebene wird noch gearbeitet [25].

Die Dicke des Bandstahls bestimmt die Wandstärke des Hüllrohres. Zur Herstellung von Hüllrohren wird Bandstahl in Dicken von 0,20 - 0,40 mm verwendet [22], [65]. Nach dem Entwurf der DIN 18553 [23] ist die Blechdicke aus Stabilitätsgründen in Abhängigkeit des Hüllrohrdurchmessers zu verändern.

Die an die Hüllrohre gestellten Anforderungen [22], [23] umfassen folgende Punkte:

- Biegeverhalten,
- Verformungswilligkeit,
- Querbelaastbarkeit,
- Zugbelaastbarkeit,
- Dichtheit,
- Maßabweichung,
- Bezogenes Profilvolumen,
- Verbindungsteile (Muffen),
- Verstärkungen.

Auf in bezug auf das Verpressen besonders wichtige Punkte wird nachfolgend näher eingegangen.

### **2.5.2 Belastbarkeit**

Plastische Verformungen des Hüllrohres während der Bauausführung führen zu Querschnittsverengungen und möglicherweise zum Verstopfer [67]. Um dem vorzubeugen, müssen Hüllrohre bestimmte Anforderungen bezüglich der Quer- und Zugbelaastbarkeit sowie

der Verformungswilligkeit erfüllen. Grundsätzlich ist zwischen dem Anwendungsfall "voll" und "leer" zu unterscheiden. Beim Anwendungsfall "voll" sind die Hüllrohre vor dem Betonieren des

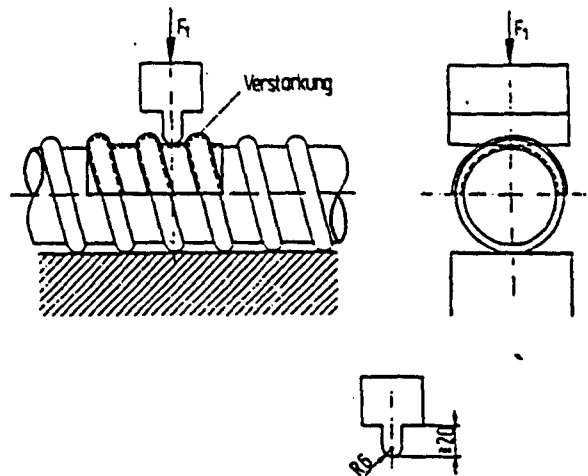


Bild 2.8: Prüfung der Querbelaubarkeit nach DIN 18553, aus [22]

Bauteils mit Spannstahl oder einer vergleichbaren Aussteifung gefüllt. Im Anwendungsfall "leer" werden die Spannstähle erst nach dem Erhärten des Bauwerksbetons in das Hüllrohr eingeschoben. Eine ausreichende Quersteifigkeit ist nach Norm gewährleistet, wenn bei einer definierten Prüflast nur eine Verringerung der lichten Weite von 5 mm [23] bzw. 5 % [22] auftritt (Bild 2.8).

### 2.5.3 Dichtheit

Die Dichtheit wird nach Norm [22], [23] im Anschluß an das Biegeverhalten, die Verformungswilligkeit (Bild 2.9) und die Querbelaubarkeit geprüft. Die Dichtheit des Hüllrohres wird nach Norm mit dem Wasserdruckversuch an einem 1100 mm langen Hüllrohrstück geprüft. Dazu wird das Hüllrohr mit Wasser gefüllt und mit einem Druck von  $p = 0,5$  bar beaufschlagt. Der Druck wird über einen Zeitraum von  $t = 5$  min konstant gehalten. Innerhalb dieser Zeit darf der Wasserverlust nur 1,5 Vol. % betragen.

Es muß bezweifelt werden, daß die unter Laborbedingungen ermittelte Dichtheit der Hüllrohre auf Bedingungen auf Baustellen übertragbar ist. Schadensanalysen zeigten sich immer wieder, daß die verlegten Hüllrohre im Bauwerk nicht ideal dicht waren. Beschädigungen der Hüllrohre entstanden beim Betonieren des Bauwerkes u. a. infolge Hüllrohrverschiebung und bei zu kleinen Rüttellücken [16], [67]. Als Folge von Hüllrohrbeschädigungen kann es sowohl zum Eindringen von Bauwerksbeton und Betonwasser in das Hüllrohr als auch zum Austreten von Einpreßmörtel in den Bauwerksbeton kommen.

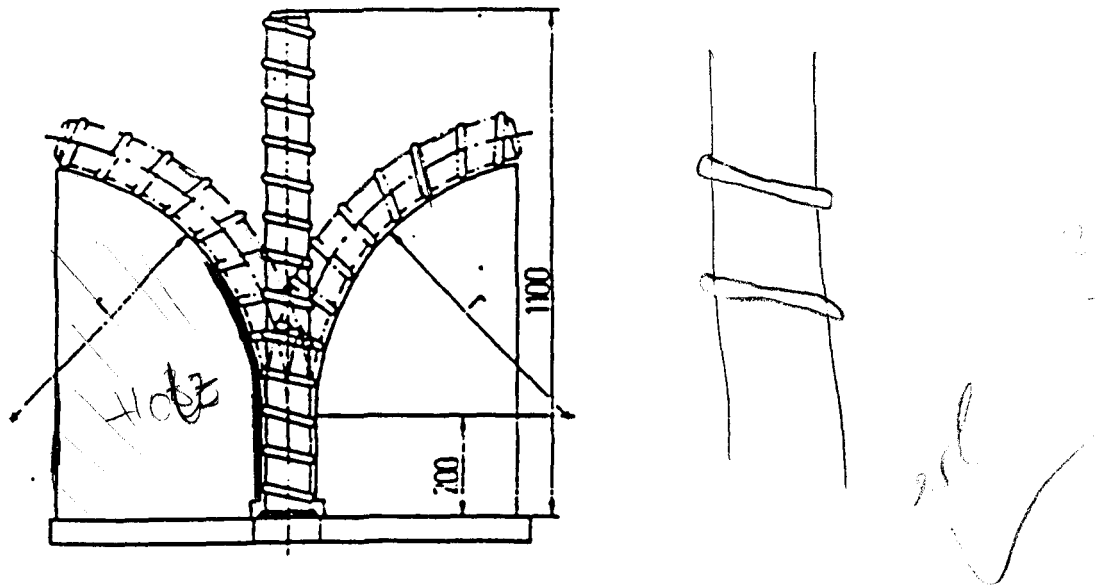


Bild 2.9: Prüfung der Verformungswilligkeit nach DIN 18553, aus [22]

#### 2.5.4 Profilierung

Nach DIN 18553 [22] muß bei Hüllrohren mindestens ein bezogenes Profilvermögen von  $0,08 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$  vorhanden sein. Bei einer Hüllrohrnennweite größer  $d = 25 \text{ mm}$  muß die Profilhöhe mindestens  $2,5 \text{ mm}$  betragen (Bild 2.10). Weitere Angaben zur Gestaltung und Größe der Sicken insbesondere bei großen Hüllrohrdurchmessern werden in der Norm nicht gemacht.

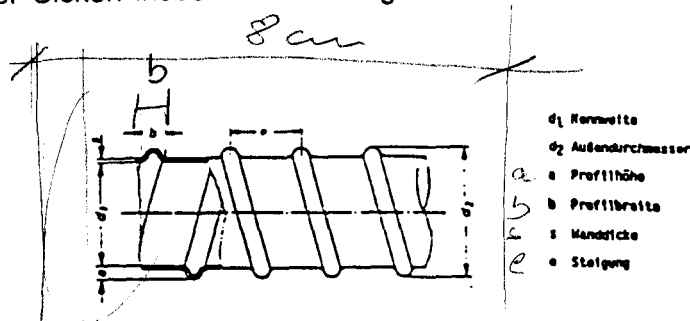


Bild 2.10: Darstellung der Hüllrohrprofilierung, aus [9]

In der Literatur sind nur wenig Hinweise zur Gestaltung der Sicken zu finden. In [34] wird berichtet, daß der Gestaltung der Sicken bei größeren Hüllrohrdurchmessern bis zum damaligen Zeitpunkt nicht angemessen Rechnung getragen wurde. In [34], [67] wird empfohlen, bei großen Hüllrohrdurchmessern eine ausreichend große Profilierung vorzusehen, damit sich aufsteigende Luftblasen und Sedimentationswasser dort sammeln können.

### 2.5.5 Verbindungsteile

An die Verbindungsteile der Hüllrohre sind nach DIN 18553 [22], [23] die gleichen Anforderungen zu stellen, wie an das Hüllrohr (s.o.). Die Hüllrohrstöße sind nach DIN 4227, T.1 abzudichten [20]. Dieses geschieht üblicherweise mit Klebeband. Es muß jedoch bezweifelt werden, daß die so hergestellten Hüllrohrstöße unter Baustellenbedingungen die gleichen Dichtigkeitsanforderungen erfüllen wie Hüllrohrabschnitte unter Laborbedingungen.

In [71] wird über Versuche zum Schließen von Hüllrohrstößen berichtet. In den Versuchen wurden die Stöße neben Klebeband auch mit Schrumpfschläuchen abgedichtet. Bei den mit Schrumpfschläuchen abgedichteten Hüllrohrstößen konnte eine bessere Dichtigkeit erzielt werden als mit den Abdichtungen mit Klebeband.

### 2.5.6 Kunststoffhüllrohre

In der jüngsten Zeit wurden in Deutschland bei Spanngliedern mit nachträglichem Verbund neben Stahlhüllrohren vereinzelt auch Kunststoffhüllrohre einzusetzen [65], [71], [97]. Ein solches Kunststoffhüllrohr ist in Bild 2.11 dargestellt. Bei externen Spanngliedern ist der Einsatz von Kunststoffhüllrohren weit verbreitet. Es werden überwiegend Kunststoffhüllrohre aus Polyäthylen (PE) oder Polypropylen (PP) verwendet.

Bei Spanngliedern mit nachträglichem Verbund verspricht die Verwendung von Kunststoffhüllrohren einen besseren Korrosionsschutz des Spannstahls als mit Stahlhüllrohren. Kunststoffhüllrohre werden durch übliche physikalische und chemische Belastungen (Feuchtigkeit, Chloride) kaum angegriffen. Durch Kunststoffhüllrohre ist der Spannstahl außerdem auf größer Länge elektrolytisch vom Bauwerksbeton entkoppelt [46], [65], [89], [90]. Der Spannstahl wird dadurch zusätzlich vor Korrosion geschützt. In England wird der Einsatz von Kunststoffhüllrohren aus genannten Gründen empfohlen [73].

In [71] wird über Versuche mit Kunststoffhüllrohren im Vergleich zu Stahlhüllrohren berichtet. Hinsichtlich Cl-Eindringung ist der Spannstahl bei der Verwendung von Kunststoffhüllrohren deutlich besser geschützt als bei Stahlhüllrohren.

Bei Kunststoffhüllrohren ist bereits ein höherer Standard in bezug auf die Dichtheit von ganzen Spanngliedern erreicht als bei Stahlhüllrohren. Hüllrohrstöße werden durch speziell gefertigte Muffenverbindungen realisiert [97]. Bei diesen Muffenverbindungen handelt es sich entweder um Verschweißmuffen oder um steckbare Kunststoffformteile mit Gummilippen. Die



Muffenverbindungen sind auf die Hüllrohre abgestimmt. Die erzielbare Dichtheit der Muffenverbindung steht dem ungestoßenen Hüllrohr kaum nach.

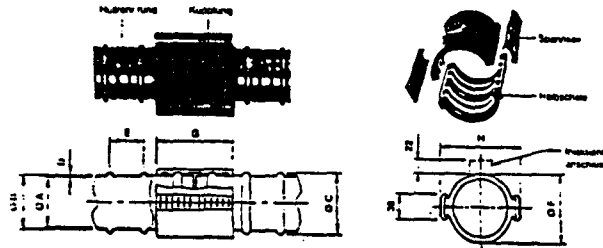


Bild 2.11: Kunststoffhüllrohr PT-Plus-System, aus [97]

In einem Verpreßversuch an einem Kunststoffhüllrohr wurde die Verpreßbarkeit eines 77 m langen Spannglieds im Vergleich zu einem Stahlhüllrohr untersucht [101]. Beim Kunststoffhüllrohr wurden keine Nachteile im Verpreßerfolg gegenüber Stahlhüllrohren festgestellt.

## 2.6 Konstruktion

### 2.6.1 Allgemeines

Aus den Ergebnissen von Verpreßversuchen an großen und langen Spanngliedern liegen Erkenntnisse darüber vor, mit welchen konstruktiven Maßnahmen die Qualität der Spanngliedinjektion verbessert werden kann. Es handelt sich um Hinweise bezüglich der maximalen Spanngliedneigung, der Anordnung von Ein- und Austrittsöffnungen sowie der Einpreß- und Nachpreßrichtung. Einen Überblick geben [33], [34], [36], [70], [73], [93]. Im folgenden wird auf die wesentlichen Punkte kurz eingegangen.

### 2.6.2 Rohrhydraulik

Die Fließbedingungen des Mörtels im Hüllrohr sind für eine gute Verfüllung des Spanngliedes entscheidend. Der Hüllrohrquerschnitt ist bei einem hohen Füllungsgrad mit Spannstählen ortsabhängig und ungleichförmig. Durch das Spannen der Spannglieder steht dem strömenden Mörtel an Tiefpunkten der untere, an Hochpunkten der obere Hüllrohrquerschnitt zur Verfügung (Bild 2.12). Zusätzlich sorgen Verzopfungen der Litzen bzw. Drähte für eine ständige Änderung

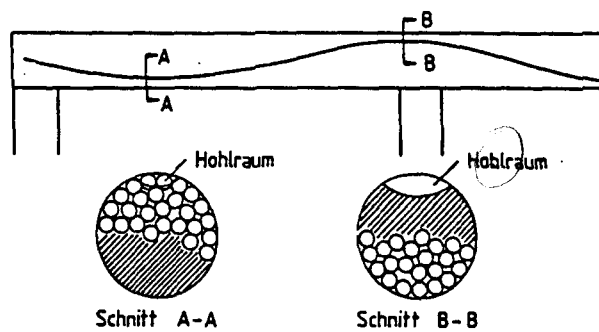


Bild 2.12: Lage des Spannstahls im Hüllrohr am Hoch- und Tiefpunkt, aus [71]

des durchströmten Querschnitts. Um einen guten Korrosionsschutz zu gewährleisten, muß der Mörtel auch zwischen die einzelnen Litzen bzw. Drähte gelangen. Das bedingt eine gute Querläufigkeit des Mörtels.

### 2.6.3 Umlenkstellen

An Umlenkstellen des Spannglieds liegen die Spannstähle im gespannten Zustand am Hüllrohr an. An der Krümmungsinne Seite ist deswegen die vollständige Umhüllung jedes Spannstahls erschwert. In der Literatur sind unterschiedliche Aussagen zur Umhüllung des Spannstahls an der Krümmungsinne Seite zu finden. Bei gerippten Ovalstäben waren auch im Bereich von Krümmungen bei engster Packungsdichte alle Zwischenräume gut verfüllt [67]. Demgegenüber waren bei einem anderen Bauwerk an der Krümmungsinne Seite Druckstellen am Hüllrohr zu erkennen. Die Stahloberflächen waren nur mit einer dünnen Zementleimschicht bedeckt. Am Spannstahl wurden leichte Korrosionserscheinungen festgestellt [49].

An Umlenkstellen ist ferner darauf zu achten, daß die Spannglieder in vertikaler Richtung ausreichend unterstützt sind. Diese trifft insbesondere für große Spannglieder zu. Die Hüllrohre müssen in waagerechter und horizontaler Richtung gut an der schlaffen Bewehrung fixiert sein, so daß sie sich beim Betonieren und Rütteln nicht verschieben können [16], [70].

### 2.6.4 Spanngliederführung und -neigung

Bei Durchlaufträgern werden die Spannglieder üblicherweise von einer Seite aus verpreßt. Der Mörtel fließt dann auch vom Hoch- zum Tiefpunkt. Bei abwärts geneigter Fließrichtung steht die Mörtelsäule partiell unter einem verminderten Druck oder ist sogar drucklos. Bei dünnflüssigen

Mörteln stellt sich ein Freispiegelgerinne ein. Die vollständige Verfüllung des Spannglieds ist nicht von vornherein sichergestellt. Mögliche Lufteinschlüsse sind in Bild 2.13 exemplarisch dargestellt. Bei einer Neigung größer 1 : 4 sollte deswegen in einem zweiten Verpreßvorgang gegengepreßt werden [34].

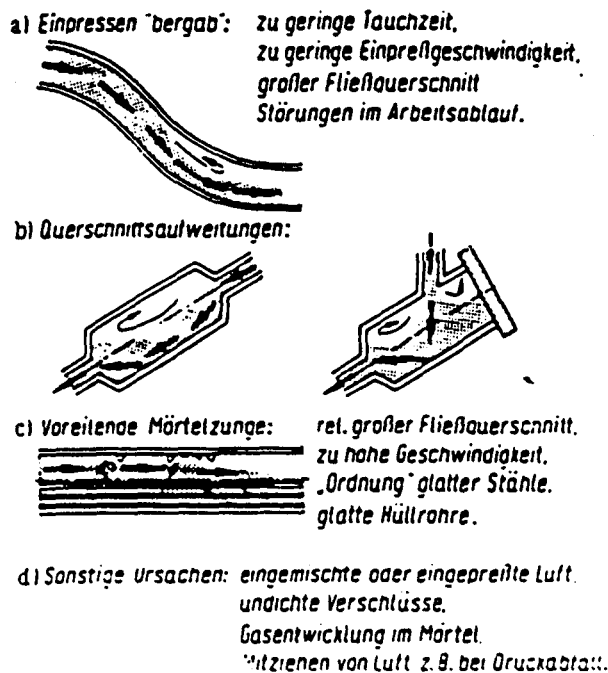


Bild 2.13: Mögliche Fehlstellen bei abwärts geneigtem Mörtelfluß, aus [33]

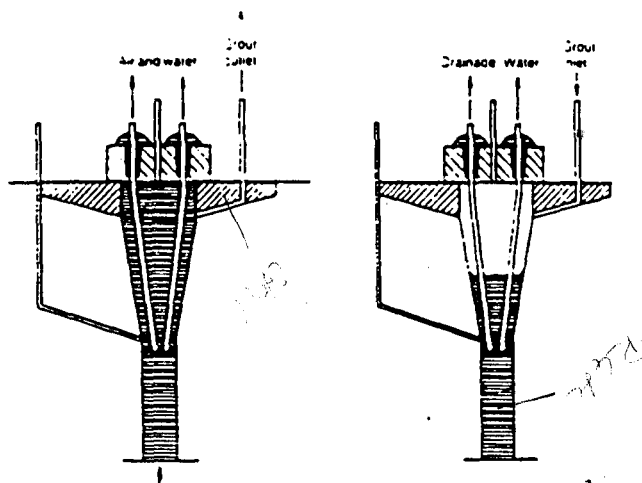


Bild 2.14: Zusätzliche Ein- und Auslauföffnungen am oberen Ende von vertikalen Spanngliedern, aus [36]

Das Verpressen vertikaler Spannglieder bereitet oft Probleme. Dabei wird der Mörtel vom Tiefpunkt aus eingepreßt. Dennoch verbleiben oft unter den oberen Ankerplatten Hohlräume [24], [36], [52]. Diese können gezielt nachverpreßt werden, sofern zusätzliche Einfüllöffnungen in der Nähe des Ankers vorgesehen sind (Bild 2.14). Die Anordnung von zusätzlichen Ein- und Auslauföffnungen wird empfohlen [33], [36].

### 2.6.5 Füllungsgrad der Hüllrohres

Die Größe des Fließquerschnitts ist für eine gute Hüllrohrinjektion von großer Bedeutung. Der Fließquerschnitt wird vom Spannstahl/Hüllrohr-Verhältnis ( $A_p/A_h$ ) bestimmt.

Bei einem zu großen Spannstahl/Hüllrohr-Verhältnis ist der verbleibende Fließquerschnitt sehr klein. Eine ordnungsgemäße Verfüllung des Spannglieds ist nicht gesichert. Es kann zum Drainageeffekt kommen, wenn Wasser durch enge Zwickel aus dem Mörtel ausgepreßt wird.

Mit abfallendem Spannstahl/Hüllrohr-Verhältnis wird der zu verpressende Querschnitt größer. Ein größerer Verpreßquerschnitt fördert jedoch die Sedimentationsneigung. Hohlräume durch aufsteigende Luftblasen und Blutwasser sind die Folge.

Ziel ist deswegen ein möglichst ausgewogenes Verhältnis von Spannstahl- zu Hüllrohrfläche ( $A_p/A_h$ ). In [36] wird von einem üblichen Verhältnis von Hüllrohr- zu Spannstahlfläche von  $A_p/A_h = 0,25 - 0,40$  ausgegangen. Liegt das Verhältnis außerhalb dieser Grenze, ist die Verpreßbarkeit der Spannglieder durch Versuche nachzuweisen.

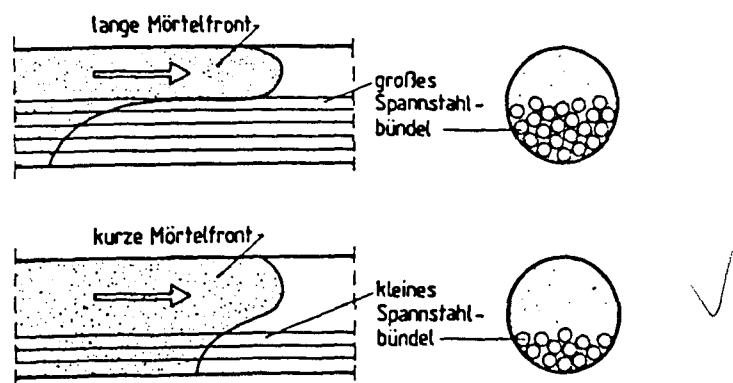


Bild 2.15: Ausbildung der Mörtelzunge bei unterschiedlichem Hüllrohrfüllungsgrad

Röhnisch [77] hat in Versuchen mit unterschiedlichem Hüllrohrfüllungsgrad Unterschiede in der Ausbildung der Mörtelzunge festgestellt. Diese sind in Bild 2.15 schematisch dargestellt. Bei einem großen freien Fließquerschnitt eilt die Mörtelzunge dort weiter voraus als im dichten Spannstahlbündel. Der Mörtel gelangte in das dichte Spannstahlbündel durch Querläufigkeit.

In Bild 2.16 sind die Verhältnisse  $A_p/A_h$  für verschiedenen Spannverfahren angegeben. Die Angaben wurden aus den jeweiligen allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen entnommen [2], [3], [97], [104], [105].

Das Bild zeigt, daß die Verhältnisse von  $A_p/A_h$  für derzeit übliche Spannverfahren (Litzen und Drahtverfahren) zwischen  $0,20 < A_p/A_h < 0,45$  liegt. Der Verhältniswert liegt etwa in den Grenzen nach [36]. Das zuverlässige Verpressen von Spanngliedern mit einem derartigen Spannstahl/Hüllrohr-Verhältnis ist unproblematisch. Bei dem Spannverfahren mit Einzelstäben von 1963 war  $A_p/A_h > 0,5$  [104]. Bei aktuellen Schadensfällen an Bauwerken wurden diese Spannglieder häufig nicht oder nur teilweise verfüllt vorgefunden [83]. Der Hüllrohrdurchmesser war nur geringfügig größer als der Stabdurchmesser. Der zu kleine Fließquerschnitt führte zu Verstopfern und somit zu unvollständig verfüllten Hüllrohren.

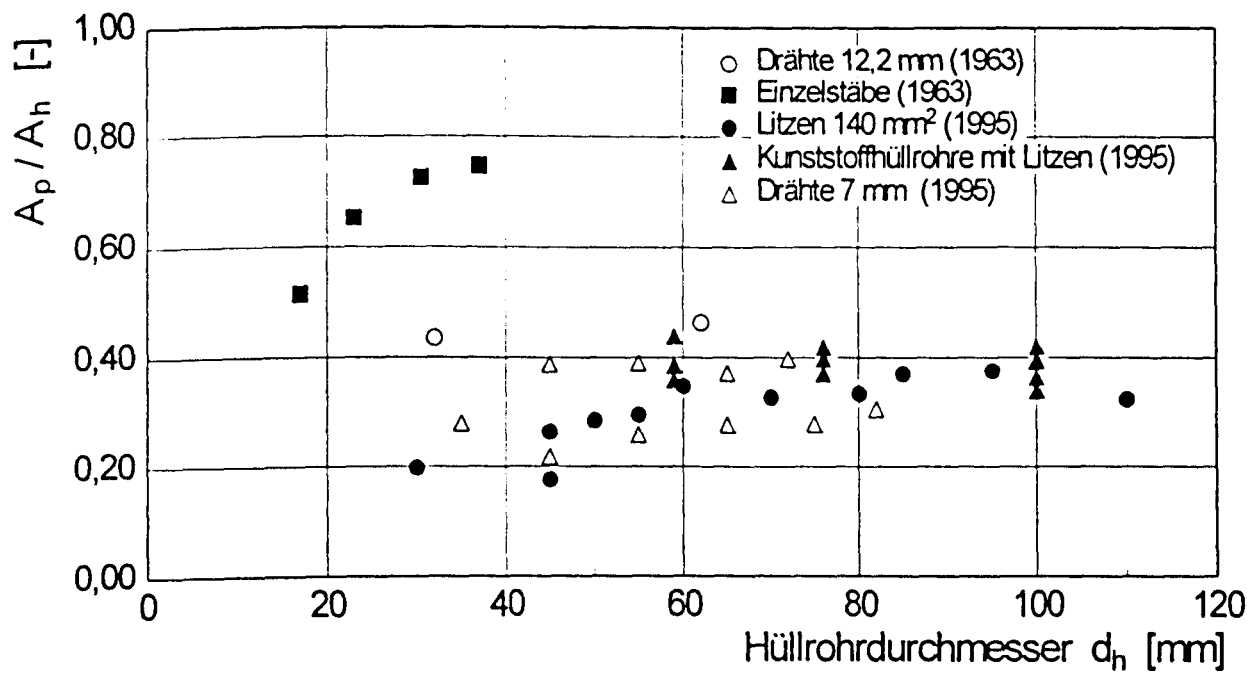


Bild 2.16: Verhältnisse  $A_p/A_h$  verschiedener Spannverfahren

### 2.6.6 Ein- und Austrittsöffnungen

Generell sollen Spannglieder aufsteigend, d.h. vom Tiefpunkt zum Hochpunkt verpreßt werden. Bei mehrfeldrigen Trägern bedingt dies Einfüllöffnungen am Tiefpunkt und Austrittsöffnungen am Hochpunkt [33], [34]. Nach ZTV-K 80 und 88 [102], [103] müssen an Hochpunkten und an Koppelstellen stets Entlüftungen angeordnet werden. An Tiefpunkten sollten nach Möglichkeit

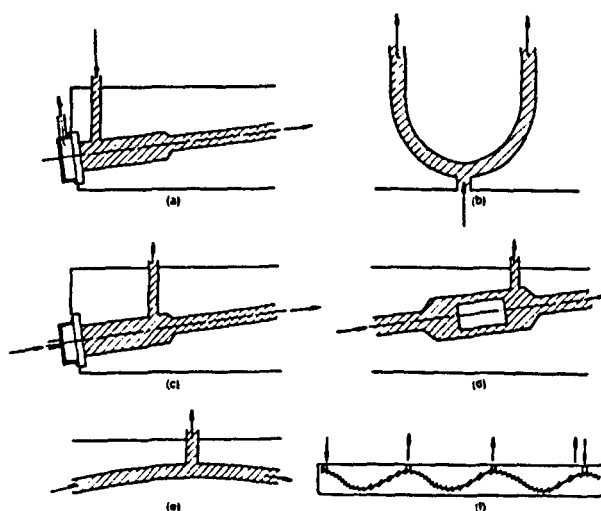


Bild 2.17: Beispiele für Ein- und Auslauföffnungen, aus [36]

Entwässerungen angeordnet werden. Zur Vereinfachung der Bauverfahrenstechnik (Vorschubrüstung) wird auf Ein- oder Auslauföffnungen an den Tiefpunkten meist verzichtet. In Bild 2.17 sind einige Beispiele für die Anordnung von Ein- und Austrittsöffnungen dargestellt.

Es wird weiterhin empfohlen, an Hochpunkten, bei geneigten Ankern und an Koppelstellen neben einer Entlüftung eine weitere Einfüllöffnung anzuordnen, um diese Stellen gezielt nachverpressen zu können [36], [65]. Die exemplarische Anordnung von Ein- und Austrittsöffnungen ist in Bild 2.18 dargestellt.

Für die Reihenfolge der Verpreßrichtung ist ein detaillierter Verpreßplan aufzustellen (Bild 2.20). Wenn eine Auslauföffnung bzw. Entlüftung beim Nachverpressen als Einpreßöffnung benutzt werden soll, muß der Einpreßschlauch vollständig mit Mörtel gefüllt sein. Andernfalls wird eine Luftblase in das Hüllrohr injiziert. In [34], [36] sind weitere Angaben zur Anordnung von Ein- und Austrittsöffnungen zu finden.

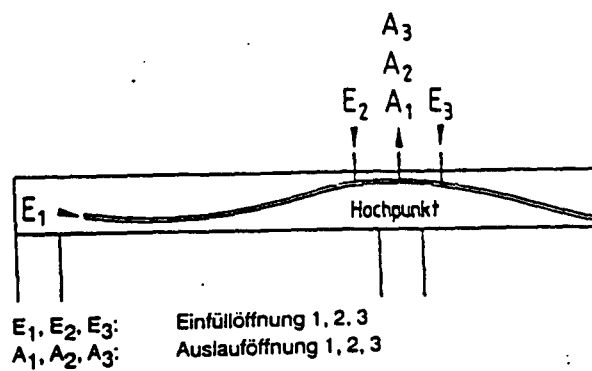


Bild 2.18: Zusätzliche Einpreßöffnung zum Nachverpressen des Hochpunktes

### 2.6.7 Verengungen

Verengungen des Hüllrohrquerschnitts behindern den Mörtelfluß. Die Fließgeschwindigkeit wird reduziert. Gleichzeitig steigt der Druck an. Sedimentation und Verstopfer können die Folgen sein [8]. Die wesentlichen Ursachen für Verengungen des Fließquerschnitts sind:

- Mörtelreste im Hüllrohr
- eingedrungener Bauwerksbeton infolge undichter Hüllrohre
- eingedrückte Hüllrohre

### 2.6.8 Aufweitungen

Ankertrompeten und Koppelstellen stellen Aufweitungen des Hüllrohrquerschnitts dar. Sie sind i.d.R. gegen die Horizontale geneigt. Das vollständige Verpressen solcher Aufweitungen ist dann problematisch. Es wird empfohlen, diese Abschnitte wie Hochpunkte zu betrachten. Sie sollten mit zusätzlichen Ein- und Auslauföffnungen versehen sein [34]. Bild 2.19 zeigt mögliche Fehlstellen durch fehlende Entlüftung an spezifischen Hochpunkten von Aufweitungen bei Ankertrompeten und Koppelstellen.

Zur Vermeidung von Hohlräumen in toten Ecken sollen Aufweitungen stets von unten nach oben verfüllt werden [21], [34], [36]. Am spezifischen Hochpunkt sollten Entlüftungen angeordnet sein, durch die die Luft entweichen kann.

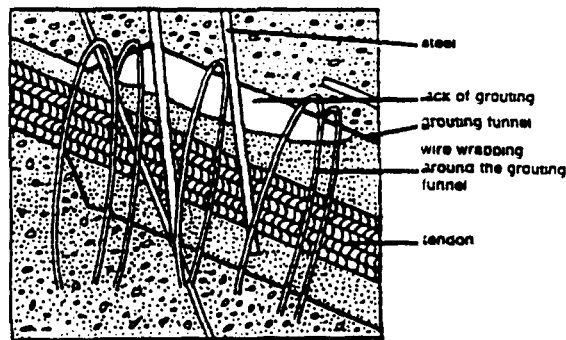


Bild 2.19: Fehlstellen in Ankern und Koppelstellen bei fehlender Entlüftung, aus [71]

## 2.7 Verpressarbeit

### 2.7.1 Allgemeines

Das Verpressen von Spanngliedern mit nachträglichem Verbund erfolgt nach DIN 4227 T. 5 [21]. Darin sind überwiegend Anforderungen und Prüfverfahren für die Einpreßmörtel festgelegt. Im Rahmen der europäischen Normung ist die prEN 446 [30] entstanden, die sich mit Einpreßverfahren befaßt. Ergänzend dazu gelten für Verpreßarbeiten die Richtlinien nach EC 2, Kap. 6.3.4 [25]. Der FIP-Guide [36] enthält darüber hinaus Richtlinien für die Verpreßarbeit.

### 2.7.2 Dichtheit

Die Dichtheit des Hüllrohres wird unter Laborbedingungen geprüft. Zweifel an der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf Baustellenbedingungen sind angebracht. In Analogie zu den Dichtheitsanforderungen unter Laborbedingungen müßten entsprechende Anforderungen unter Baustellenbedingungen entwickelt werden. Unsicherheiten bei der Dichtheit an Hüllrohrstößen ließen sich dadurch ausschließen. Die geltenden Normen (DIN 4227, T. 5, pr EN 446, EC 2) sind in dieser Hinsicht unzureichend [73].

Im Pipelinebau ist es üblich, die Dichtigkeit von Rohren in situ zu prüfen. Der zu prüfende Rohrabschnitt wird dafür unter Innendruck gesetzt und der zeitabhängige Druckabfall registriert. Die Dichtigkeitsanforderung wird über den Druckabfall formuliert. Das Verfahren scheint auch für die Dichtigkeitsprüfung von Spanngliedern geeignet, Stichwort: Gasdetektoren [66]. Die breite Anwendung dieses Verfahrens bei Spanngliedern ist nicht bekannt.



### 2.7.3 Durchgängigkeit

Die Durchgängigkeit des Spannglieds auf ganzer Länge ist Voraussetzung für das zuverlässige Verpressen. Sie ist vor dem Verpreßvorgang zu prüfen [21]. Dieses geschah in der Vergangenheit häufig mit Wasser, heute ist die Prüfung mit Luft üblich.

In der ZTV-K 80 [102] wurde gefordert, die Durchgängigkeit der Hüllrohre mit Wasser zu prüfen. Grundsätzlich geben die allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen für die Spannverfahren Auskunft, ob das Spülen mit Wasser erlaubt ist. Als wesentliche Gründe für eine Wasserspülung galten:

- Prüfung der Durchgängigkeit,
- Vornässen des Spanngliedes, um Verstopfen vorzubeugen,
- Abtransport von Schmutz aus dem Spannkanal.

Das Spülen der Hüllrohre vor dem Verpressen ist aber problematisch, da oft erhebliche Wassermengen im Hüllrohr zurückbleiben [67]. Der Injektionsmörtel ist nur bedingt in der Lage, das Wasser beim Verpressen zu verdrängen. Der W/Z-Wert kann an der Mörtelfront unkontrolliert anwachsen. Kann das Wasser beim Verpreßvorgang nicht vollständig verdrängt werden, sammelt es sich an Hochpunkten und verursacht Hohlräume. Das Austreiben von Restwasser aus dem Hüllrohr ist auch bei Anwendung des Vakuumverfahrens sehr eingeschränkt [51]. Es wurde daher empfohlen, die Wasserspülung nur noch bei der Beseitigung von Verstopfen einzusetzen [70]. Anschließend sollten die Spannglieder mit Luft ausgeblasen werden, um das Restwasser möglichst auszutreiben [21]. Aufgrund möglicher Probleme mit der Wasserspülung stellt sie heute die Ausnahme dar. Die Durchgängigkeit der Hüllrohre wird stattdessen mit Luft geprüft. Dies wird auch vom Sachverständigenausschuß "Spannverfahren" empfohlen.

### 2.7.4 Einpreßgeschwindigkeit

Die Einpreßgeschwindigkeit ist für die Qualität der Spanngliedverpressung entscheidend. Nach DIN 4227 T. 5, Abs. 4.4 [21] sind Pumpendruck und Einpreßgeschwindigkeit auf die Erfordernisse der Spannglieder abzustimmen. Die zulässigen Einpreßgeschwindigkeiten sind i.d.R. in den allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen der Spannverfahren angegeben.

Die maximale Einpreßgeschwindigkeit wird von der Pumpenleistung und vom Hüllrohrdurchmesser bestimmt. Bei Geschwindigkeiten über  $v = 30 \text{ m/min}$  sind Fehlstellen vorprogrammiert [79]. Üblicherweise werden Einpreßgeschwindigkeiten von  $5 \leq v \leq 15 \text{ m/min}$  gewählt [36]. Bei diesen Verpreßgeschwindigkeiten sind Fehlstellen relativ gering.

Versuche haben ergeben, daß gerade bei hohen Einpreßgeschwindigkeiten und großen Hüllrohrdurchmessern die Querläufigkeit zwischen den Litzen nicht mehr gesichert ist [79]. In solchen Fällen sollten deswegen Verpreßgeschwindigkeiten  $v < 10 \text{ m/min}$  gewählt werden.

Bei Einpreßversuchen an Großspanngliedern mit Einpreßgeschwindigkeiten zwischen  $1,40 < v < 6,00 \text{ m/min}$  wurden keine Unterschiede bei der Ummantelung der Spannglieder mit Mörtel festgestellt [67]. Zu einem ähnlichem Resultat führt ein Versuch an einem 120 m langen Spannglied, bei dem mit einer mittleren Einpreßgeschwindigkeit zwischen 4 und 8 m/min eine gute Füllung des Hüllrohrs erreicht wurde [34].

### 2.7.5 Einpreßdruck

Der Einpreßdruck ergibt sich bei vorgewählter Fließgeschwindigkeit aus der Summe der Fließwiderstände. Er ist auf  $p = 20 \text{ bar}$  ( $= 2 \text{ MPa}$ ) [30], [36] zu begrenzen, um

- ein Platzen der Schläuche, bzw. der Ein- und Austrittsöffnungen zu vermeiden,
- Schäden an der Betonkonstruktion zu vermeiden,
- Geräte vor Beschädigungen zu schützen,
- das Bedienungspersonal zu schützen,
- eine Entmischung des Mörtels zu vermeiden.

Der Einpreßdruck ist mit Hilfe eines Manometers zwischen Pumpe und Einfüllöffnung während der Verpreßarbeiten zu kontrollieren.

Es wird immer wieder berichtet, daß Mörtel zum Sedimentieren neigt, wenn er unter hydrostatischem Druck steht [62], [89]. Dieses hängt offenbar mit dem Luftgehalt in der Suspension zusammen. Der Luftgehalt entscheidet darüber, wieviel Zementpartikel in Schwebelage gehalten werden können. Detaillierte Untersuchungen zum Einfluß des Druckes auf die Sedimentationsneigung sind nicht bekannt.

### 2.7.6 Nachverpressen

Zur Qualitätsverbesserung der Hüllrohrinjektion ist ein Nachverpressen sinnvoll. Das Nachverpressen von der gleichen Seite wie beim Erstverpressen verspricht nur wenig Nutzen. Vielmehr sollte von mehreren Punkte aus nachverpreßt werden [18], [39]. Das Nachverpressen sollte bei normalen Temperaturbedingungen ( $T = 20 - 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ )  $t = 20 - 30 \text{ min}$  nach dem ersten Einpressen erfolgen [18].

In der pr EN 446 [30] wird eine Unterscheidung in Nacheinpressen und Nachpressen vorgenommen:

- Nacheinpressen: Zusätzliches Einpressen, um Luft- oder Wasserblasen durch Einpreßmörtel in den Spannkanälen zu ersetzen, bevor der ursprüngliche Einpreßmörtel erhärtet (Druckabschlußverfahren).
- Nachpressen: Zusätzliches Einpressen, um Luft- oder Wasserblasen durch Einpreßmörtel in den Spannkanälen zu ersetzen, wenn der ursprüngliche Einpreßmörtel erhärtet ist.

Beim Nacheinpressen werden die entstandenen Hohlräume nach Beendigung der Einpreßarbeiten unter kontinuierlicher Drucksteigerung weiter verpreßt. Demgegenüber ist der Mörtel beim Nachpressen bereits erhärtet.

*Ersatz!*

~~Bei Durchlaufträgern ist das Nachverpressen der Hochpunkte empfehlenswert.~~ Dieses kann durch zusätzliche Einfüllöffnungen unterhalb der Hochpunkte geschehen. Für das Nachverpressen sollte ein detaillierter Verpreßplan aufgestellt werden. Ein Beispiel dafür zeigt Bild 2.20.

Bild 2.21 zeigt die Anordnung von zusätzlichen Ein- und Auslauföffnungen zum Nachverpressen von Ankertrompeten und Koppelankern. Diese sind bei geeigneter Lage stets von unten nach oben zu verpressen.

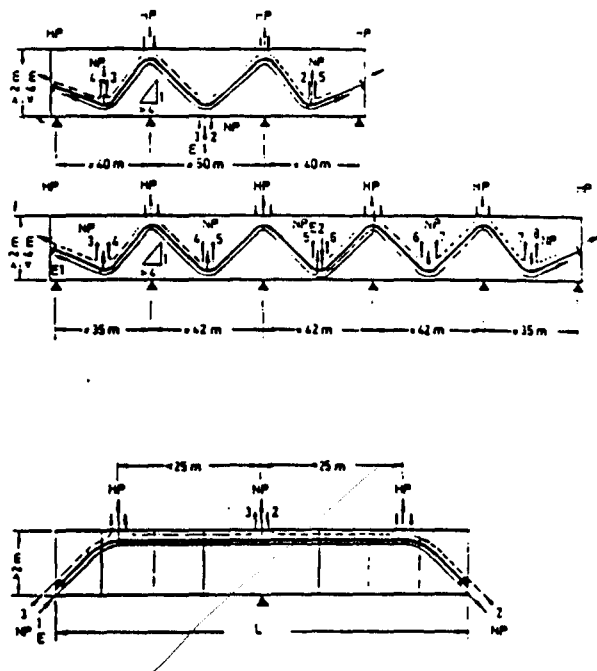


Bild 2.20: Verpreßplan einschließlich Nachverpressen für einen Durchlaufträger, aus [34]

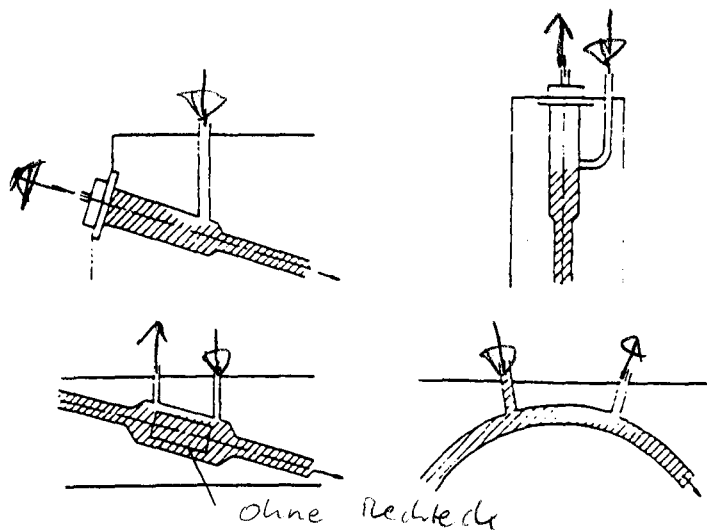


Bild 2.21: Zusätzliche Ein- und Auslauföffnungen zum Nachpressen, aus [36]

Nach Engelke et al. [34] kann auf das Nachverpressen bei Hüllrohrdurchmessern bis 95 mm verzichtet werden, wenn folgende Bedingungen eingehalten sind:

- Höhendifferenz zwischen Hoch- und Tiefpunkt  $< 2,0$  m,
- Krümmungsradius  $> 10$  m,
- Hüllrohrneigung  $< 1 : 4$

Eine Abwandlung des Nachverpressens stellt das Erhärten unter Druck dar. Es gibt unterschiedliche Möglichkeiten dieses zu realisieren:

- Nachdem Mörtel guter Konsistenz aus den Entlüftungen ausgetreten ist, werden diese geschlossen. Während der Erhärtung wird der Druck über einen gewissen Zeitraum konstant gehalten.
- An den Entlüftungen werden Standrohre angebracht, die mit Mörtel gefüllt sind. Die Anordnung eines Standrohres ist in Bild 2.22 dargestellt. Vorteil dieses Verfahrens ist, daß sich Sedimentationswasser im Standrohr sammeln kann [34], [52].
- Bei der Rißverpressung werden Packer als Ventile verwendet. Sie gestatten ebenfalls einen konstanten Druck während der Erhärtung. Gleichwohl verfügen sie über ein Mörtelreservoir, das ein ständiges Nachfließen von Mörtel erlaubt. Solche Packer müßten aus den Bedürfnissen bei Spanngliedinjektion angepaßt werden.

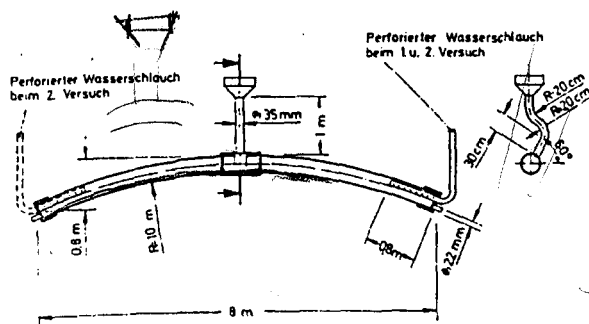


Bild 2.22: Anordnung eines Standrohres am Hochpunkt, aus [34]

Bezüglich der Sedimentationsneigung ist es entscheidend, ob während der Erhärtung ein offenes oder geschlossenes System vorliegt. Vorteilhaft bei einem offenen System ist, daß Luftblasen und Sedimentationswasser aufsteigen und sich an den Hochpunkten sammeln können.

### 2.7.7 Vakuumverfahren

Das Vakuumverfahren wurde in der Vergangenheit in erster Linie für das nachträgliche Verfüllen von Hohlräumen bei Sanierungsmaßnahmen angewendet [41], [51], [52], [63]. In Frankreich wird gefordert, daß Spannglieder über 100 m Länge auch beim Erstinjizieren vakuumunterstützt zu verpressen sind.

Beim Vakuumverfahren wird der Hohlraum evakuiert. Der Hohlraum wird dann durch die Vakuumunterstützung gefüllt. Das Verfahren eignet sich besonders, wenn von einer Seite aus

eingepreßt wird und an der anderen Seite keine Entlüftung vorhanden ist. Beim Nachverpressen mit dem Vakuumverfahren sollte die Tauchzeit des Mörtels nach dem Mischen von  $t_{Ta} = 30 \text{ sec.}$  auf  $t_{Ta} = 15 \text{ sec.}$  reduziert werden [41].

In [52] wird über Verpreßversuche mit dem Vakuumverfahren an lotrechten Spanngliedern berichtet. Verpreßt wurde mit einem PCC-Mörtel. Aufgrund der geringen Mörtelviskosität traten Hohlräume nur am oberen Spanngliedende auf. Diese Hohlräume konnten aufgrund ihrer Lage leicht nachverpreßt werden.

Der hohe apparative Aufwand bei Vakuumverfahren ist eigentlich nur bei Sanierungsarbeiten gerechtfertigt, wenn außer der Einlauföffnung keine weitere Hohlraumentlüftung vorhanden ist. Beim ersten Verpressen von üblichen Spanngliedern mit einer ausreichenden Anzahl von Entlüftungsöffnungen an den Hochpunkten verspricht das Vakuum-Verfahren keine Vorteile. Das Verpressen von einer Seite ist ausreichend. Zu diesem Ergebnis kommt auch die Arbeitsgruppe in England [73].

## **2.7.8 Temperatur während des Verpressens**

### **2.7.8.1 Allgemeines**

Die Erstarrung und Erhärtung des Einpreßmörtels wird entscheidend vom herrschenden Temperaturregime seiner Umgebung (Außenluft, umgebendes Bauwerk, Eigentemperatur des Mörtels) bestimmt. Sowohl zu hohe als auch zu niedrige Temperaturen wirken sich negativ auf die Qualität der Spanngliedinjektion aus.

In der pr EN 446 [30] sind Höchst- und Mindesttemperaturen für Luft, Bauteil und Einpreßmörtel angegeben (Tab. 2.1). Können diese Temperaturen nicht eingehalten werden, sind besondere Vorkehrungen erforderlich, um das einwandfreie Verpressen der Spannglieder sicherzustellen. Die maximale Mörteltemperatur wird demgegenüber im FIP-Guide [36] mit  $T = 40^\circ\text{C}$  angegeben. Nach DIN 4227, T. 5 [21] soll die Frischmörteltemperatur nach dem Mischen nicht größer sein als  $T = 35^\circ\text{C}$ .

Tab.2.1: Temperaturen beim Verpressen, aus [30]

	Luft	Bauteil	Einpreßmörtel
Mindesttemperatur [°C]	5	5	10
Höchsttemperatur [°C]	30	25	25

Neben der Lufttemperatur hat die Bauwerkstemperatur erhebliche Einfluß auf das Verpressen und die Erhärtung. Aufgrund der größeren Masse stellt die Bauwerkstemperatur das bestimmende Temperaturregime für die verpreßten Spannglieder dar. Nach DIN 4227, T. 5 [21] ist eine zusätzliche Eignungsprüfung erforderlich, wenn die Bauwerkstemperatur unter  $T = 10\text{ °C}$  oder die Lufttemperatur unter  $T = 5\text{ °C}$  liegt.

### 2.7.8.1 Hohe Temperaturen

Hohe Temperaturen während des Verpressens treten vornehmlich im Sommer auf. Aufgrund der Randbedingungen (hohe Lufttemperatur, Strahlungswärme) sind dann auch hohe Mörteltemperaturen zu erwarten. Bei hohen Temperaturen besitzt der Mörtel eine schlechtere Fließfähigkeit. Temperaturen von  $T > 30\text{ °C}$  sind als kritisch anzusehen [34].

Durch Strahlungswärme oder Hydratationswärme massiger Bauteile können gleichzeitig hohe Bauwerkstemperaturen entstehen. Bei Überlagerung von hoher Luft-, Mörtel- und Bauwerkstemperatur steift der Mörtel schneller an. Ein hoher Einpreßdruck ist erforderlich. Auch Verstopfer können die Folge sein.

### 2.7.8.2 Tiefe Temperaturen

Im Winter können durch Überlagerungseffekte (Mörtel, Luft, Bauwerk) ebenso ungünstige Temperaturbedingungen auftreten. Temperaturen unter  $T = 5\text{ °C}$  wirken sich negativ auf die Erhärtung aus. Es muß sichergestellt sein, daß die Temperatur auch während der Erhärtung nicht unter den Gefrierpunkt absinkt. Dieses betrifft insbesondere die Bauwerkstemperatur. Sie bestimmt die Temperaturgeschichte des Einpreßmörtels während der Erhärtung am meisten. Gegebenenfalls müssen Maßnahmen ergriffen werden, um eine Mindestbauwerkstemperatur von  $T = 5\text{ °C}$  sicherzustellen, z.B. Querschnitt heizen. Die Bauwerkstemperatur sollte in kritischen Phasen überwacht werden.

Treten Temperaturen unter dem Gefrierpunkt auf, bevor die Spannglieder verpreßt sind, ist darauf zu achten, daß sich kein Restwasser im Hüllrohr befindet. Dieses kann Eisdruck

verursachen, der schließlich zum Sprengen des Hüllrohres führen kann [89]. Schmilzt das Eis erst nach dem Verpressen des Spannglieds, bleiben Hohlräume zurück.

## **2.8 Zusammenfassung und offene Fragen**

Nach dem Literaturstudium ergeben sich offene Fragen bezüglich vorrangig zu folgenden Elementen des Verpressens:

### **Ausgangsstoffe**

- Wie unterscheiden sich die chemischen-physikalischen Eigenschaften gebräuchlicher Zemente für Einpreßarbeiten?
- Lassen sich Qualitätsanforderungen für Zemente formulieren, die sich zum Verpressen eignen?
- Sind Korrelationen zwischen Zement- und Mörtleigenschaften erkennbar?
- Welchen Einfluß haben Zusatzmittel und -stoffe auf die Mörtleigenschaften?

### **Eignungsversuche für Mörtel**

- Sind die unterschiedlichen Prüfverfahren für Fließfähigkeit, Volumenänderung und Wasserabsondern in gleicher Weise aussagekräftig?

### **Verhältnisse im Hüllrohr**

- Werden die Verhältnisse im Hüllrohr durch Eignungsversuche gut abgebildet?
- Wie wirken sich unterschiedlich fließfähige Mörtel auf die Strömungsbedingungen im Hüllrohr aus?
- Wie sind die Erhärtungsbedingungen im Hüllrohr im Vergleich zu den Bedingungen bei Normprüfung?
- Sind bessere Kontrollen über die Hüllrohrverfüllung während der Verpreßarbeit möglich?



### **3 MÖRTELVERSUCHE - STOFFE, ANFORDERUNGEN, PRÜFUNGEN**

#### **3.1 Ziele der Mörtelversuche**

Die Mörtelversuche wurden mit folgenden Zielstellungen ausgeführt:

- Untersuchung möglicher Zusammenhänge zwischen chemisch-physikalischer Zementeigenschaften und den Mörtel Eigenschaften,
- Einfluß von Modifikationen auf die Mörtel Eigenschaften mit dem Ziel zur Herstellung robuster Einpreßmörtel,
- Überprüfung der Brauchbarkeit der Prüfverfahren unter dem Aspekt der Eignung unter Baustellenbedingungen,
- Vergleichbarkeit der Prüfverfahren bei Einführung der europäischen Normen.

#### **3.2 Auswahl der Ausgangsstoffe**

##### **Zemente**

Für die Versuche wurden 13 Zemente (PZ 45 F) verschiedener Hersteller eingesetzt (Z 1 - Z 12, Z 14). Vergleichend wurde ein PZ 35 F Zement verwendet (Z 13). Es wurden solche PZ 45 F Zemente ausgewählt, die von der Praxis für das Verpressen von Spanngliedern bevorzugt werden. Die Zementhersteller wurden bei der Bestellung darauf hingewiesen, daß die Zemente für die Herstellung von Einpreßmörtel gemäß DIN 4227, T. 5 geeignet sein sollten.

Gleichzeitig wurden die Zementhersteller um chemische Analysen und Ergebnisse von granulometrischen Untersuchungen gebeten. Teilweise wurden chemische Analysen und Korngrößenverteilungen aus Produktionsmittelwerten zur Verfügung gestellt. Teilweise wurde auch von den Lieferchargen Proben genommen und davon chemische Analysen sowie Korngrößenverteilungen zur Verfügung gestellt.

Aufgrund von unterschiedlicher Probennahme und Prüfverfahren waren die Ergebnisse der physikalisch-chemischen Untersuchungen der Zementwerke nicht vergleichbar. Die für die Versuche verwendeten Zemente wurde deswegen einheitlich naß-chemisch analysiert. Weiterhin wurden die Korngrößenverteilungen mittels Lasergranulometer untersucht. Tab. A-4.1 zeigt die verwendeten Zemente und die Ergebnisse der chemischen Analysen.

Die verwendeten Zemente wurden zusätzlich von einem Forschungsinstitut der Zementindustrie mittels Röntgenfluoreszenz-Analyse (RFA) analysiert. Außerdem wurden Zementuntersuchungen gemäß DIN 1164 ausgeführt. Dabei ging es u.a. um Kalorimetrie, Wasseranspruch und C<sub>3</sub>A-Reaktivität. Die Untersuchungsergebnisse sind in Tab. A-4.2 zusammengestellt.

### **Einpreßhilfen**

Für die Versuche wurden nur bauaufsichtlich zugelassene Einpreßhilfen verwendet. Da das Hauptaugenmerk nicht in der Untersuchung der Einpreßhilfen lag, wurde der überwiegende Teil der Versuche mit der Einpreßhilfe EH 1 ausgeführt. Punktuell wurden auch andere Einpreßhilfen verwendet.

Durch gezielte Versuche wurde der Einfluß von Fließmittel eingehend untersucht. Konnte in Abhängigkeit des Zementes nur ein schlecht fließfähiger Mörtel hergestellt werden (Tauchzeiten  $t_{Ta} > 80$  sec bei  $W/Z = 0,38$ ), wurde dem Mörtel zusätzlich Fließmittel zugegeben. Das Fließmittel war identisch mit jenem in der verwendeten Einpreßhilfe.

### **Zusatzstoffe**

Bei den eigenen Versuchen wurden Mörtel mit Zugabe von Mikrosilika-Slurry (MS) hergestellt. Der Wasseranteil (50,0 M.-%) der Slurry wurde auf das Zugabewasser angerechnet. Es wurden in erster Linie jene Mörtel mit MS modifiziert, die ein verstärktes Wasserabsondern zeigten.

Die Wirkung einer Kunststoffdispersion wurde durch punktuelle Versuche mit anderen Mörtelmodifikationen verglichen. Im Fordergrund der Versuche mit der Kunststoffdispersion stand die Eigenschaften bezüglich Fließfähigkeit und Wasserabsondern.

## **3.3 Versuchsumfang**

Zunächst wurden Einpreßmörtel nach DIN 4227, T. 5 mit den zur Verfügung stehenden Zementen (Z 1 - Z 14) mit einer Standardrezeptur ( $W/Z = 0,38$  und 1,0 % EH 1, T = 20 °C, Mischer O) hergestellt. Bei einigen ausgewählten Mörteln wurde die Rezeptur durch gezielte Zugabe von Wasser, FM, Mikrosilika (MS) oder Kunststoffdispersion (Ku) modifiziert.

Die Mörtel wurden überwiegend mit einem baustellengerechten Kolloidal-Mischer der Fa. Obermann (Mischer O) angemischt. Bei einigen Mörtelrezepturen wurde ein Swibo-Mischer (Mischer S) verwendet. Bei den Verpreßarbeiten auf einer Baustelle wurde der Mörtel mit

einem hoctourig arbeitenden Mischer der Fa. VSL hergestellt (Mischer V), vergl. Kap. 2.4.4.2. Mit den Baustellenmischern wurden jeweils Mischchargen mit 50 oder 100 kg Zement angemischt. Punktuell wurde kleinere Mischchargen mit 10 kg Zement mit einem Handmischer (Mischer H) hergestellt.

In einer weiteren Versuchsserie wurden die Mörtелеigenschaften mit einigen Zementen bei unterschiedlichen Mörteltemperaturen ( $T_{M, \text{Soll}} = 5\text{ °C}, 20\text{ °C}$  und  $30\text{ °C}$ ) geprüft. Die Ausgangsstoffe (Zement und Wasser) wurden für die Versuche in einer Klimakammer bei der entsprechenden Temperatur vorgelagert. Die Mörtelherstellung erfolgte bei Raumtemperatur ( $T = 20\text{ °C}$ ) mit dem Mischer O. Die Meßzylinder zur Bestimmung von Volumenänderung und Wasserabsondern wurden bis zum Versuchsende  $t = 3\text{ h}$  nach dem Mischen in der Klimakammer bei  $T = 5\text{ °C}, 20\text{ °C}$  bzw.  $30\text{ °C}$  gelagert. Die Tauchzeit wurde zum Zeitpunkt  $t = 0\text{ min}, 30\text{ min}$  und  $60\text{ min}$  nach dem Mischen geprüft. Der Mörtel für die Tauchversuche wurde zwischen den Prüfzeitpunkten im Vorratsbehälter gerührt. Der Vorratsbehälter konnte nicht temperiert und auch nicht in der Klimakammer aufgestellt werden. Dadurch strebte die Mörteltemperatur bis zum Prüfzeitpunkt  $t = 60\text{ min}$  gegen  $T = 20\text{ °C}$ .

Einen Überblick über die Mörtelvariationen enthält Tab. 3.1. Die Mörtelrezepturen und die Ergebnisse der Eignungsprüfung sind in Tab. A-4.4 im einzelnen dargestellt.

Tab. 3.1: Überblick über die Mörtelvariationen im Rahmen der Mörtelversuche

	EH	Mischer	Zusatzmittel	Temperatur
<b>Standardrezeptur</b> Zemente Z 1 - Z 14	EH 1	O	-	20 °C
<b>Verschiedene Variationen</b> div. Zemente	EH 1, 2, 3	O,S,H	-, FM	20 °C
<b>Mikrosilika</b> Z 1, Z 9, Z 10, Z 11, Z 13	EH 1	O	MS, z.T. FM	20 °C
<b>Kunststoffdispersion</b> Z 1	EH 1	O, S	Ku	20 °C
<b>Temperatur</b> Z 1, Z 9, Z 11, Z 12, Z 13	EH 1, 4	O	-	5, 20, 30 °C

### 3.4 Mörtelprüfung

#### 3.4.1 Stand der Mörtelprüfung nach Norm

Die Anforderungen an Einpreßmörtel sind in DIN 4227, T. 5 [21] geregelt. Im Rahmen der europäischen Normung sind die Entwürfe prEN 445 [29] und prEN 447 [31] entstanden; prEN 445 befaßt sich mit den Prüfverfahren, prEN 447 mit den Anforderungen. Bei den Normenentwürfen prEN 445 und prEN 447 ist eine deutliche Weiterentwicklung gegenüber DIN 4227 T. 5 zu erkennen.

Gemäß DIN 4227, T. 5 [21] sind folgende Eigenschaften des Einpreßmörtels zu prüfen:

- Fließvermögen,
- Raumänderung (Absetzen und Quellen)
- Druckfestigkeit,
- Frostbeständigkeit.

Im Entwurf der europäischen Norm prEN 447 [31] sind folgenden Prüfungen auszuführen:

- Fließvermögen,
- Wasserabsondern,
- Volumenänderung,
- Druckfestigkeit.

Die Beurteilungskriterien und Prüfverfahren beider Normen entsprechen sich im wesentlichen, sind jedoch nicht identisch. Die Aufteilung der Raumänderung (DIN 4227, T. 5) in Wasserabsondern und Volumenänderung (prEN 447) scheint für die gezielte Beurteilung des Mörtelverhaltens sinnvoll. Auf die Unterschiede wird an den jeweiligen Stellen eingegangen.

Im Rahmen der Versuche wurden die Mörtel Eigenschaften in erster Linie gemäß der Normen (DIN 4227, T. 5 [21], prEN 445 [29] und prEN 447 [31]) geprüft. Bei diesen Prüfverfahren handelt es sich um baustellengerechte und -übliche Prüfverfahren. Diese standen im Rahmen der Forschungsarbeit im Vordergrund.

Teilweise wurde von den Normprüfverfahren geringfügig abgewichen. Volumenänderung und Wasserabsondern wurde in erster Linie gemäß prEN 445 und 447 geprüft. Die Geometrie der Prüfgefäße wurde dabei abweichend von der Norm gewählt.

Ergänzend wurden einige Laborversuche ausgeführt. Bei den Verpreßversuchen an Modellrohren und Spanngliedern wurden Eignungsversuche direkt vor dem Einpressen ausgeführt. Die für die Versuche gewählten Prüfverfahren werden nachfolgend erläutert.

### 3.4.2 Fließfähigkeit - Prüfverfahren und Anforderungen

Die Fließfähigkeit von Einpreßmörtel wird nach DIN 4227, T. 5 [21] mit dem Tauchversuch gemessen. Maßgebend ist die Tauchzeit, in welcher der Tauchkolben im Tauchrohr absinkt. Den Versuchsaufbau zeigt Bild 3.1. Die Versuchsdurchführung ist in DIN 4227, T. 5 eingehend beschrieben.

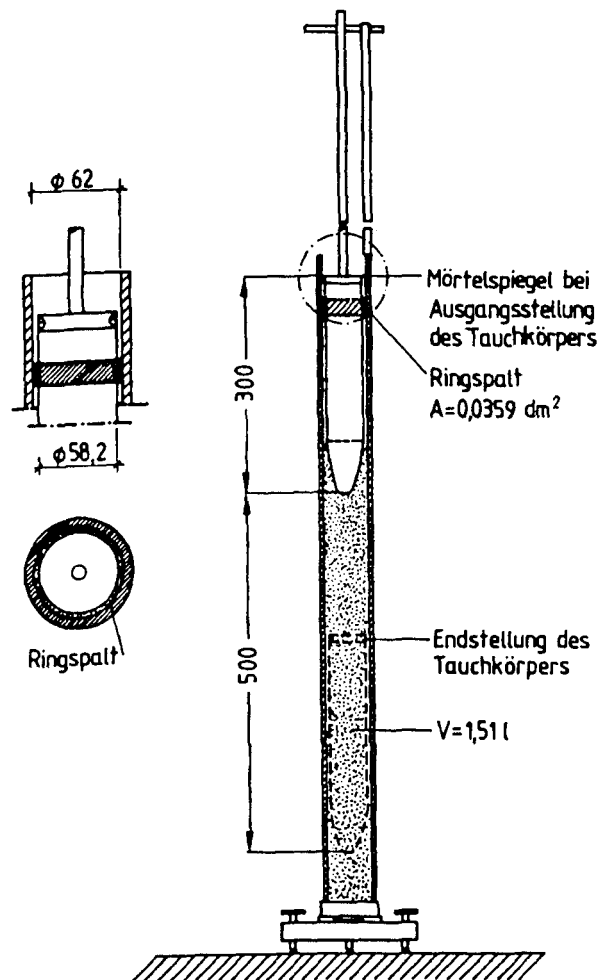


Bild 3.1: Tauchgerät gemäß DIN 4227, T. 5 bzw. pr EN 445, aus [21]

Für eine richtige Tauchzeitmessung muß das Tauchgerät kalibriert sein. Das ist wichtig, da z.B. Mörtelreste am Tauchkolben oder im Tauchrohr das Meßergebnis beeinflussen. Das Kalibrieren wird mit Glycerin ( $\rho = 1,23 \text{ g/cm}^3$ ) bei einer Temperatur von  $T = 20^\circ\text{C}$

durchgeführt. Der Vorgang entspricht einem üblichen Tauchversuch [29]. Die Tauchzeit soll  $t_{Ta} = 34 \text{ sec} \pm 1 \text{ sec}$  betragen.

Die europäischen Normen prEn 445 - 447 lassen darüber hinaus die Prüfung der Mörtelfließfähigkeit mit einem Trichter zu. Die Auslaufdüse hat bei diesem Trichter einen Innendurchmesser von  $d_i = 10 \text{ mm}$ , Bild 3.2a. Das Trichtervolumen beträgt bis zur oberen Markierung ca.  $V = 1,5 \text{ l}$ . Gemessen wird die Auslaufzeit von  $V = 1,0 \text{ l}$  Mörtel. Die Auslaufzeit mit einem 10-mm Trichter wird im folgenden mit  $t_{Tr}$  abgekürzt. Trichter mit einer 10 mm-Auslaufdüse sind in Deutschland z.Z. noch nicht verbreitet. Für die Versuche mußte ein Trichter angefertigt werden.

Die Abmessungen des Trichters entsprechen bis auf die Auslaufdüse jenen des Marsh-Trichters. Der Marsh-Trichter hat jedoch eine Auslaufdüse mit einem Innendurchmesser von  $d_i = 4,76 \text{ mm}$ , Bild 3.2b. Bei dem Marsh-Trichter beträgt die Auslaufzeit von  $V = 1,0 \text{ l}$  Süßwasser bei einer Temperatur von  $T = 20 \text{ °C} \pm 3 \text{ K}$   $t_{MT} = 28 \text{ sec} \pm 0,5 \text{ sec}$ . Die mit dem Marsh-Trichter gemessene Auslaufzeit wird mit  $t_{MT}$  abgekürzt.

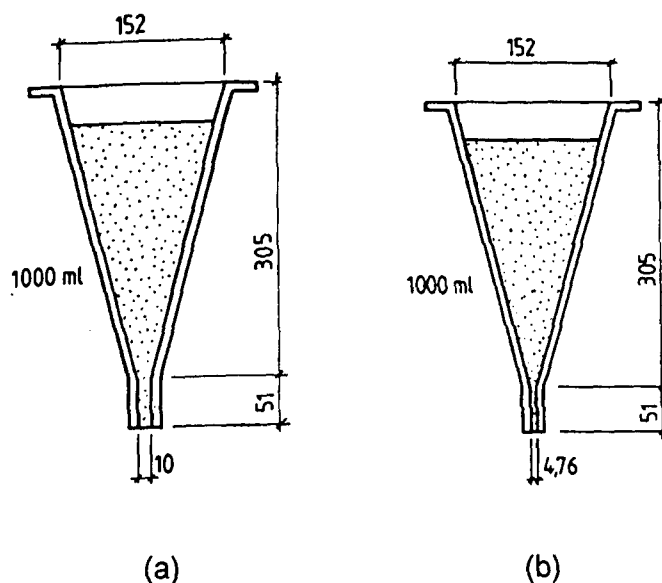


Bild 3.2: (a) Auslauftrichter mit 10 mm Auslaufdüse, (b) Marsh-Trichter mit 4,76 mm Auslaufdüse

Beide Trichterformen (mit 10 mm und 4,76 mm Auslaufdüse) sind in der DASTb-Richtlinie [12] zur Prüfung der Mörtelfließfähigkeit angegeben. Die Trichter sind in Abhängigkeit der Fließfähigkeit auszuwählen. Sehr dünnflüssige Mörtel sind mit dem Trichter mit einer 4,76 mm-Auslaufdüse zu prüfen; dickflüssige Mörtel mit dem Trichter mit 10 mm-Auslaufdüse.

Im FIP-Guide "Grouting of tendons in prestressed concrete" ist zur Prüfung der Fließfähigkeit von Einpreßmörteln ein weiterer Trichter angegeben [36], [95]. Der Trichter ist in Bild 3.3 dargestellt. Der Trichter hat bis zur Markierung ein Volumen von  $V = 1,725\text{ l}$ . Für die Beurteilung der Fließfähigkeit wird die Auslaufzeit des gesamten Trichtervolumens gemessen.

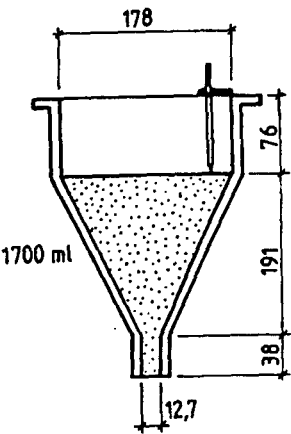


Bild 3.3: Auslaufrichter gemäß US- Corps of Engineers Method CRD-C79-58 mit 12,7 mm Auslaufdüse, aus [95]

Die Anforderungen an die Fließfähigkeit gemäß DIN 4227, T. 5 und prEN 447 sind in Tab. 3.2 zusammengestellt.

Tab. 3.2: Anforderungen an die Fließfähigkeit von Einpreßmörteln, aus [31]

Prüfverfahren	Unmittelbar nach dem Mischen [sec]	30 Minuten nach dem Mischen [sec]	an der Auslauföffnung des Hüllrohres [sec]
Tauchzeit $t_{Ta}$ mit Tauchgerät	$\geq 30$	$\leq 80$	$\geq 30$
Trichterzeit $t_{Tr}$ mit Trichter (10 mm Düse)	$\leq 25$	$\leq 25$	$\geq 10$

Eine Beschränkung von Tauch- und Trichterzeit nach unten ( $t_{Ta} \geq 30\text{ sec}$ ,  $t_{Tr} \geq 10\text{ sec}$ ) soll sicherstellen, daß der Mörtel nicht zu dünnflüssig ist, z.B. durch Restwasser im Hüllrohr. Die obere Grenze für Tauch- und Trichterzeit ( $t_{Ta} \leq 80\text{ sec}$ ,  $t_{Tr} \leq 25\text{ sec}$ ) gewährleistet die Verpreßbarkeit von Spanngliedern bei angemessenem Einpreßdruck.

Die obere Grenze der Tauchzeit von  $t_{Ta} \leq 80\text{ sec}$  wird durch allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen für Kolloidalmischer teilweise aufgehoben. Für den mit dem "Swibo-Mischer" hergestellten Mörtel gilt eine maximale Tauchzeit  $t_{Ta} \leq 200\text{ sec}$  [1].

Bei den Versuchen wurde die Fließfähigkeit mit dem Tauchgerät und dem 10 mm-Auslauftrichter geprüft. Die Prüfung wurde nach dem Mischen, 30 Minuten nach dem Mischen und soweit möglich 60 Minuten nach dem Mischen ausgeführt. Der Marsh-Trichter mit 4,76 mm-Auslaufdüse wurde nur bei sehr dünnflüssigen Mörteln verwendet, u.a. bei den Mörteln, die mit Kunststoffdispersion modifiziert wurden. Der Trichter gemäß US-Norm wurde nur vergleichend bei einem Mörtel eingesetzt.

### 3.4.3 Volumenänderung und Wasserabsondern - Prüfverfahren und Anforderungen

Die Prüfverfahren zur Bestimmung von Wasserabsondern und Volumenänderung hängen eng zusammen. Da beide Phänomene etwa zeitgleich ablaufen, ist ein gemeinsames Prüfverfahren sinnvoll. Das Wasserabsondern wird nach prEN 445 und prEN 447 gezielt gemessen. Tab. 3.3 zeigt die Prüfverfahren für Wasserabsondern und Volumenänderung gemäß DIN 4227, T. 5 und prEN 445 und prEN 447 im Vergleich.

Tab. 3.3: Prüfverfahren für die Bestimmung von Wasserabsondern und Volumenänderung, (bzw. Räumänderung gemäß DIN 4227, T. 5)

	DIN 4227, T. 5	pr EN 445 und 447
Wasserabsondern	- Dose d = 98 mm, h = 120 mm	- 100 ml-Meßzylinder (durchsichtig) d = 25 mm, h = 250 mm  - Zylinder (durchsichtig) d = 50 mm, h = 200 mm  - [FIP- Guide: Zylinder (durchsichtig) d = 100 mm, h = 127 mm]
Volumenänderung	- Dose d = 98 mm, h = 120 mm	- Zylinder (durchsichtig) d = 50 mm, h = 200 mm  - Dose d = 98 mm, h = 120 mm

Die Fließanforderungen an Einpreßmörtel sind in DIN 4227, T. 5 und prEN 445 und prEN 447 nicht identisch. Tab 3.4 zeigt die Anforderungen im Vergleich.



Tab. 3.4: Anforderungen an Einpreßmörtel bezüglich Wasserabsondern und Volumenänderung

	DIN 4227, T. 5	pr EN 445 und 447
Wasserabsondern	nach 28 d kein Wasser auf der Probe	nach 3 h max. $V_w = 2,0 \%$
Volumenänderung	nach 24 h max. $\Delta V = \pm 2,0 \%$	nach 24 h $-1,0 \leq \Delta V \leq + 7,0 \%$

3.4.3.1 Auswahl der Prüfverfahren für Wasserabsondern und Volumenänderung

Im Rahmen der Forschungsarbeit wurden Wasserabsondern und Volumenänderung mit den in Tab. 3.5 angegebenen Verfahren gemessen.

Tab. 3.5: Prüfverfahren zur Bestimmung von Wasserabsondern und Volumenänderung bei den ausgeführten Versuchen

	Prüfverfahren bei den ausgeführten Versuchen
- Wasserabsondern - Volumenänderung  (Prüfung im Alter von 1 h, 3 h, 4 h, 24 h)	- Dose d = 98 mm, h = 120 mm  - 100 ml-Meßzylinder (transparent) d = 25 mm, h = 250 mm  - 250 ml-Meßzylinder (transparent) d = 36 mm, h = 250 mm  - 1.000 ml-Meßzylinder (transparent) d = 62 mm, h = 350 mm  - 1,0 m-Standrohr (transparent) d = 36 mm, h = 1,0 m

In Deutschland ist derzeit die Prüfung der Volumenänderung mit Dose und Tiefenmaß am verbreitetsten. Das Prüfverfahren wurde deswegen auch bei den Versuchen angewendet. Die Prüfung wurde gemäß DIN 4227, T. 5. durchgeführt. Parallel wurden Wasserabsondern und Volumenänderung mit den im Tab. 3.5 angegebenen Meßzylindern und einem 1 m-Standrohr gemessen.

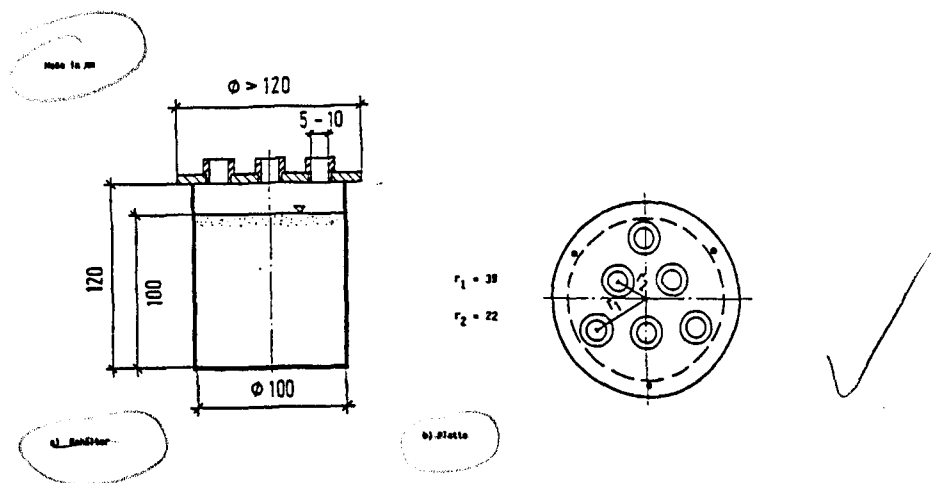


Bild 3.4: Dose mit Tiefenmaß zur Bestimmung von Wasserabsondern und Volumenänderung, gemäß DIN 4227, T. 5 *TAN*

Der durchsichtige Meßzylinder mit einem Volumen von  $V = 100$  ml entspricht dem der Norm prEN 445 und 447. Ergänzend wurde ein durchsichtiger Meßzylinder mit einem Volumen von  $V = 250$  ml eingesetzt. Dieser hatte ähnliche Abmessungen wie jener, mit dem nach prEN 445 und 447 die Volumenänderung alternativ bestimmt werden kann. In der DASTb-Richtlinie

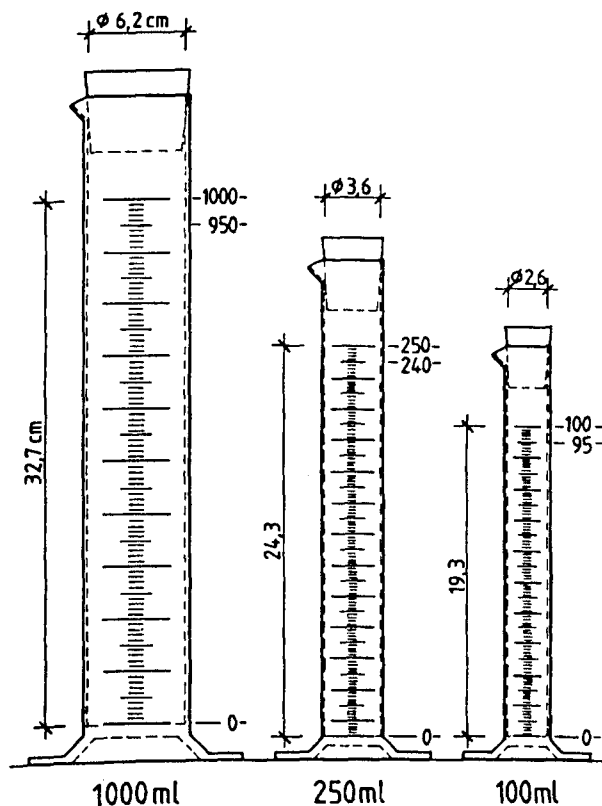


Bild 3.5: Unterschiedliche durchsichtige Standzylinder zur Bestimmung von Wasserabsondern und Volumenänderung

"Schutz und Instandhaltung von Betonbauteilen" [12] wird Wasserabsondern mit einem Meßzylinder mit  $V = 1.000 \text{ ml}$  gemessen. Dieser Zylinder wurde ebenfalls verwendet.

Bei Spanngliedern kann, z.B. bei girlandenförmiger Verlegung oder bei vertikalen Spanngliedern, eine hohe Mörtelsäule auftreten. Zur Nachbildung höherer Mörtelsäulen wurden Wasserabsondern und Volumenänderung zusätzlich in einen  $h = 1,0 \text{ m}$  hohen PVC-transparent-Rohr bestimmt. Die Rohre wurden für die Versuche mit einem Boden versehen. An der Außenseite der Rohre war zum Ablesen des Mörtelspiegels eine Millimeterteilung angebracht.

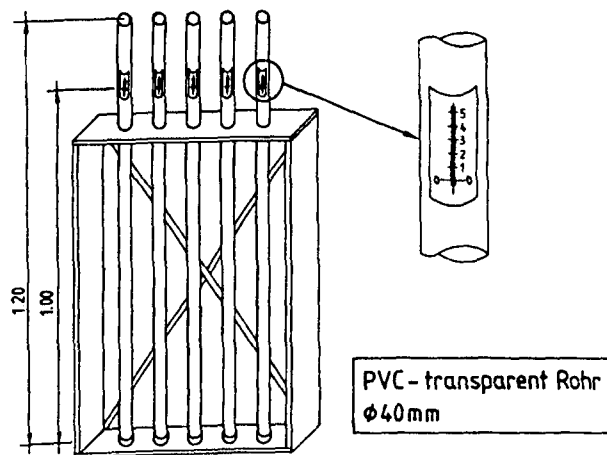


Bild 3.6: 1,0 m-Standrohr (aus PVC-transparent) zur Bestimmung von Wasserabsondern und Volumenänderung

### 3.4.3.2 Versuchsdurchführung zur Bestimmung von Wasserabsondern und Volumenänderung

Die Meßzylinder, Dosen und 1 m-Standrohr wurden auf eine waagerechte, stabile Unterlage gestellt und mit frischem Mörtel bis zur festgelegten Markierung gefüllt (100 ml-Meßzylinder bis  $V_0 = 95 \text{ ml}$ , 250 ml-Meßzylinder bis  $V_0 = 240 \text{ ml}$ , 1.000 ml-Meßzylinder bis  $V_0 = 950 \text{ ml}$  gefüllt). Das Transparentrohr wurde bis zu einer Mörtelsäule von  $h = 1,00 \text{ m}$  gefüllt.

Sofort nach dem Füllen von Meßzylinder und 1 m-Standrohr wurden diese mit einem Gummistopfen verschlossen, um das Verdunsten von Wasser zu verhindern. Das Verschließen der Gefäße ist zur wirklichkeitsnahen Nachbildung der Verhältnisse im Spannglied wichtig, da auch dort ein Wasserverlust durch Verdunstung weitgehend ausgeschlossen ist. Bis zum Ende der Messung nach 24 h wurden die Meßzylinder und das 1,0 m-Standrohr nicht bewegt.

Der Mörtelspiegel und das abgesetzte Wasser wurde im Mörtelalter von  $t = 1 \text{ h}$ ,  $3 \text{ h}$ ,  $4 \text{ h}$  und  $24 \text{ h}$  nach der Mörtelherstellung abgelesen. Schon bei den ersten Versuchen zeigte sich, daß das nach  $t = 3 \text{ h}$  abgesetzte Wasser zum Ablesezeitpunkt nach  $t = 24 \text{ h}$  wieder vollständig vom Mörtel aufgenommen war. Deswegen wurde bei den nachfolgenden Versuchen das abgesetzte Wasser nach  $t = 3 \text{ h}$  vorsichtig abgegossen und mit einem kleinen Meßzylinder ( $V = 10 \text{ ml}$ ) gemessen. Anschließend wurde das Wasser wieder auf die Probe zurückgegossen.

### 3.4.4 Druckfestigkeit - Prüfverfahren und Anforderung

Die Druckfestigkeit des Mörtels wird nach DIN 4227, T. 5 an Zylindern geprüft. Als Form für die Zylinder dienen die Dosen, an denen die Volumenänderung bestimmt wird. Nach prEN 445 kann die Druckfestigkeit auch an Mörtelprismen bestimmt werden. Tab. 3.6 gibt einen Überblick über Prüfkörper und Anforderungen.

Tab. 3.6: Prüfkörper zur Bestimmung der Druckfestigkeit sowie Festigkeitsanforderungen

	DIN 4227, T. 5	prEN 445, 447
Prüfkörper	- Zylinder $d = 100 \text{ mm}$ , $h = 80 \text{ mm}$	- Zylinder $d = 100 \text{ mm}$ , $h = 80 \text{ mm}$ - Prisma $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$
Anforderung	$f_{c,28d} \geq 27 \text{ N/mm}^2$ (Einzelproben) $f_{c,28d} \geq 30 \text{ N/mm}^2$ (Probenserie)	$f_{c,7d} \geq 27 \text{ N/mm}^2$ $f_{c,28d} \geq 30 \text{ N/mm}^2$

Eine ausreichende Festigkeit ist für die Verbundwirkung zwischen Spannstahl und Bauwerksbeton wichtig. Außerdem läßt die Druckfestigkeit Rückschlüsse auf die Qualität des Festmörtels zu. Bei Verwendung von Zement PZ 45 F und Einhaltung eines W/Z-Wertes  $W/Z \leq 0,44$  ist das Erreichen einer Druckfestigkeit  $f_{c,28d} \geq 30 \text{ N/mm}^2$  i.a. ohne weiteres möglich. Die Druckfestigkeit wurde bei den untersuchten Einpreßmörteln an Zylindern ( $d = 100 \text{ mm}$ ,  $h = 80 \text{ mm}$ ) geprüft.

### 3.5 Weitere Laborversuche

#### 3.5.1 Rotationsviskosimeter

In der Vergangenheit wurde Einpreßmörtel mit drehzahlgesteuerten Rotationsviskosimetern geprüft [63], [78]. Diese Versuche wurden mit einer maximalen Drehzahl bis  $n = 500 \text{ U/min}$  ausgeführt.

Bei den hier ausgeführte Versuchen wurde die Mörtelviskosität punktuell mit zwei verschiedenen Rotationsviskosimetern bestimmt. Die Versuche stellten Tastversuche dar, da ein Rotationsviskosimeter ein nicht baustellengeeignetes Prüfgerät ist. Außerdem wurde bezweifelt, daß mit einem Rotationsviskosimeter aufgrund der hohen Drehzahl die für einen Verpreßvorgang maßgebende Viskosität bestimmt wird.

Bei dem ersten Viskosimeter handelte es sich um ein vergleichsweise einfaches Gerät (Fa. Brookland). Bei dem Viskosimeter wurde das Prüfmedium in ein Gefäß mit einem beliebigen Durchmesser gegeben. In das Medium wurde der Rotationszylinder gesteckt. Während der Versuche war die Drehzahl ( $n = 200 \text{ U/min}$ ) konstant. Der Scherwiderstand wurde gemessen.

Bei dem zweiten Viskosimeter handelte es sich um ein Gerät der Fa. Harke. Bei diesem Gerät wurde das Prüfmedium in einen Zylinder mit einem definierten Durchmesser gegeben. Anschließend wurde der Rotationszylinder hineingesteckt, so daß ein enger Spalt verblieb. Während der Steigerung der Rotationsgeschwindigkeit (bis  $n = 500 \text{ U/min}$ ) wurde der Scherwiderstand kontinuierlich gemessen.

Die mit beiden Geräten gemessenen Werte waren nicht identisch. Dieses ist darauf zurückzuführen, daß sich die Zementkörner in dem engen Spalt bei dem Harke-Viskosimeter ausrichten konnten. Demgegenüber wurde das Meßergebnis bei dem Brookland-Viskosimeter offenbar durch das gesamte Behältervolumen beeinflusst. Manns et al. [62] gehen davon aus, daß mit einem Rotationsviskosimeter die scheinbare Viskosität einer Bingham-Flüssigkeit gemessen wird.

Da die Schergeschwindigkeit bei schnell rotierendem Rotationszylinder größer ist als im Spannglied, scheinen die Ergebnisse nicht repräsentativ für das Praxisverhalten. Aus allen genannten Gründen wurden keine weiteren Viskosimeterversuche mit Einpreßmörteln durchgeführt.

### 3.5.2 Porosimetrieuntersuchung

Die treibende Wirkung der Einpreßhilfen führt zu Poren im Mörtel. Porenverteilung und -volumen sollten für unterschiedliche Kombinationen von Zementen und Einpreßhilfen untersucht werden. Es sollte geklärt werden, ob ein Zusammenhang zwischen der Volumenänderung und Porenvolumen bzw. Porenverteilung besteht.

Porenverteilung und -volumen sind für den Frostwiderstand und den Transportwiderstand gegenüber aggressiven Medien von Bedeutung. Frost- und Transportwiderstand sollten jedoch nicht direkt untersucht werden.

Porenverteilung und -volumen wurden von einigen erhärteten Einpreßmörteln im Alter von  $t = 28$  d mit Hilfe der Quecksilberdruckporosimetrie untersucht. Die Proben wurden vor dem Versuch mindestens  $t = 72$  h evakuiert, um das Porenwasser auszutreiben.

### 3.5.3 Filterpresse

#### 3.5.3.1 Untersuchungsrelevanz

Die Stabilität von Schlitzwandsuspensionen wird mit Hilfe einer Filterpresse untersucht (DIN 4127, [19]). Mit dem Filterpressenversuch soll das Wasserauspressen durch die Filterwirkung des Bodens simuliert werden. Beurteilungskriterium ist die aus der Suspension ausgepreßte Wassermenge. Bei Wasserverlust nimmt die Fließfähigkeit der Suspension ab.

Der Filterpressenversuch versprach auch in bezug auf das Verpressen von Spanngliedern relevante Hinweise. In Spanngliedern kann es zwischen den Litzen zum Auspressen von Wasser kommen. Verstopfer sind die Folge. Steht ein Mörtel zur Verfügung, bei dem die ausgepreßte Wassermenge minimal ist, behält dieser auch beim Pressen durch enge Zwickel seine Konsistenz. Auf diese Weise können Verstopfer durch Auspressen von Wasser vermieden werden.

#### 3.5.3.2 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Bild 3.7 zeigt den Versuchsaufbau der Filterpresse. Der Mörtel wurde bis zur Markierung in den umgekehrten massiven Stahltopf gegeben. Das kleine Loch im Topfboden wurde mit einem Finger verschlossen. Auf die Mörteloberfläche wurde ein Filterpapier gelegt. Anschließend wurde ein Dichtring eingelegt und der Topf mit einem Deckel verschlossen. Der Deckel hatte auf der Innenseite ein Stahlsieb. In der Deckelmitte war ein Zentrumsloch angeordnet. Der Stahltopf wurde umgekehrt und an ein Stativ gehängt. Durch das Loch im

Topfboden wurde der Mörtel mit Druckluft beaufschlagt. Das Filtratwasser tropfte durch das Zentrumloch im Deckel in ein Becherglas. Die Versuche wurden in Anlehnung an DIN 4127 [19] ausgeführt. Der Filtrationsdruck von  $p = 7 \text{ bar}$  wurde innerhalb von  $t = 30 \text{ sec}$  aufgebracht.

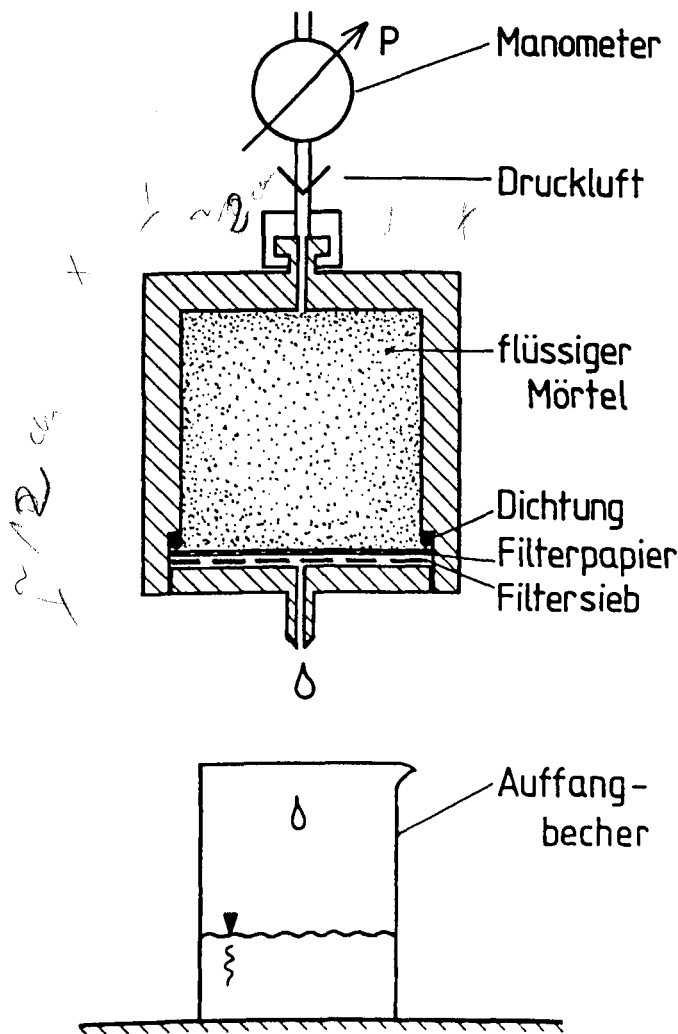


Bild 3.7: Filterpresse

### 3.5.4 Wasserabsondern unter erhöhtem Druck

Wie in Kap. 2.5.5 ausgeführt, wird in der Literatur immer wieder darauf hingewiesen, daß die Neigung zum Wasserabsondern zunimmt, wenn der Mörtel unter erhöhtem Druck steht [62], [89]. Die Feststellung resultiert aus der Beobachtung der Wasserabsonderung im Spannglied. Dort steht der Mörtel nach Abschluß des Verpreßvorgangs unter einem höheren Druck als bei der Eignungsprüfung in der Dose oder im Standzylinder.

### 3.5.4.1 Versuchsaufbau und Versuchsbeschreibung

Dem Mörtelverhalten bei einem erhöhten Druck sollte in Versuchen gezielt nachgegangen werden. Die dafür gebaute Versuchseinrichtung ist in Bild 3.8 dargestellt. Es handelte sich um ein durchsichtiges Rohr, das an den Enden durch Endkappen verschlossen war. In den Endkappen waren Kugelhähne eingeschraubt. Die obere Öffnung war über einen Druckschlauch mit einem Druckluftkompressor verbunden. Zwischen dem durchsichtigen Rohr und dem Kompressor war ein Regelventil und ein Manometer geschaltet. Die untere Öffnung diente zum Entleeren des Rohren.

Der Mörtel wurde durch die obere Öffnung in das Rohr bis zur Markierung eingefüllt. Anschließend wurde die Mörtelsäule mit  $p = 10 \text{ bar}$  Luftdruck für  $t = 60 \text{ min}$  beaufschlagt. Die Wasserabsonderung wurde an der Skala beobachtet und abgelesen.

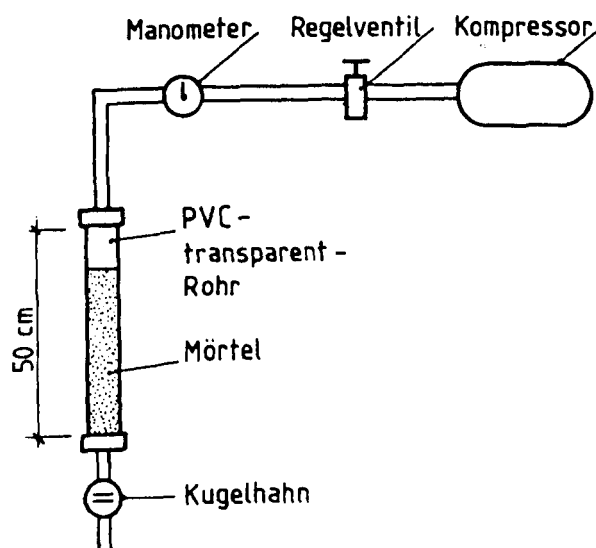


Bild 3.8: Versuchsaufbau zur Beobachtung der Wasserabsonderung unter erhöhtem Druck

## 3.6 Mikrozement

### 3.6.1 Erkenntnisstand und Zielstellung

Im Bereich der Mikrozemente wurde in den vergangenen Jahren umfangreiche Forschungs- und Entwicklungsarbeit betrieben. Mikrozemente werden in erster Linie für Bodeninjektionen und Rißinjektion bei Stahlbetonbauteilen verwendet [53], [54], [55], [56]. Sie lösen teilweise



kunststoffgebundene Injektionsmaterialien ab. Es lag auf der Hand, deren Eignung für die Hüllrohrinjektion zu überprüfen.

Mikrozemente zeichnen sich durch einen besonders hohen Feinkornanteil aus. Sie werden deswegen auch Feinstzemente genannt. Die große Mahlfineinheit kann derzeit mit üblichen Mühlen nicht gezielt hergestellt werden. Die Mikrozemente werden daher durch Absondern des Feinkorns aus üblichen Portlandzementen gewonnen.

Der Wasseranspruch der Mikrozemente ist aufgrund des großen Feinkornanteils besonders hoch. Ein W/Z-Wert von 2,0 ist üblich. Durch gezielte Zugabe von Fließmitteln gelingt es, Wasseranspruch deutlich zu reduzieren, bis  $W/Z = 0,85$ . Bei Zugabe von Fließmittel werden Mikrozemente als Zwei-Komponenten-System bestehen aus trockenem Zement und einer Flüssigkeit geliefert. Die Flüssigkeit enthält neben dem Wasser die erforderlichen Zusatzmittel (Fließmittel usw.).

Wegen des hohen W/Z-Werts werden mit Mikrozementen jedoch nur mittlere Festigkeiten erreicht. Positive Eigenschaften von Mikrozementen sind die besonders gute Fließfähigkeit und das geringe Wasserabsondern.

### 3.6.2 Auswahl und Durchführung der Versuche

Für die Versuche wurde ein Mikrozement ausgewählt, der aus trockenem Zementmehl und einer flüssigen Phase bestand. Der W/Z-Wert wurde mit Hilfe von Fließmittel auf  $W/Z = 0,85$  eingestellt. Der Mikrozement wurde vom Hersteller fertig konfektioniert in Chargen von 10 kg (Zement, Wasser und Zusatzmittel) geliefert.

Der Mikrozement wurde nach Vorgabe des Herstellers im Eimer mit einen Turbomischer für Mikrozement (Kolloidalmischer) gemischt. Nach vollständiger Zugabe des trockenen Zementmehls wurde der Mörtel drei Minuten lang gemischt.

Für die Bestimmung der Mörtелеigenschaften (Fließfähigkeit, Wasserabsondern) sind bestimmte Prüfverfahren festgelegt [12]. Die Mörtel aus Mikrozement wurden sowohl mit ihren spezifischen Prüfverfahren als auch mit jenen für Einpreßmörtel [21], [29], [31] geprüft.

Abschließend wurde eine 15 m langes Spannglied mit dem Mörtel aus Mikrozement verpreßt. Das Spannglied war über einen Sattel gelegt und mit 5 Litzen ( $100 \text{ mm}^2$ ) gefüllt. Die Litzen waren nicht vorgespannt. Auf den Verpreßversuch wird noch eingegangen.

## 4 ERGEBNISSE DER MÖRTELVERSUCHE

### 4.1 Überblick

Die Ergebnisse der Mörtelversuche sind wie folgt gegliedert:

- Mörtelergebnisse mit der Standardrezeptur,
- Ergebnisse der chemisch-physikalischen Zementuntersuchungen,
- Ergebnisse der Mörtelmodifikationen mit FM, MS und Kunststoffdispersion,
- Mörtelergebnisse bei hohen und tiefen Temperaturen,
- Mörtelergebnisse mit Mikrozement,
- Ergebnisse ergänzender Laborversuche,
- Erfahrungen mit den Mischern.

### 4.2 Ergebnisse der Mörtelprüfungen der Standardrezeptur

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Mörtelprüfungen der Standardrezeptur ( $W/Z = 0,38$ , 1,0 % EH 1,  $T = 20\text{ °C}$ , Mischer O) vorgestellt. Die Ergebnisse aller Mörtelprüfungen sind in Tab. A-4.4 wiedergegeben.

#### 4.2.1 Ergebnisse zur Fließfähigkeit

Bei allen Mörteln wurde die Tauchzeit sofort nach dem Mischen gemessen. Bei einem  $W/Z$ -Wert von  $W/Z = 0,38$  und 1,0 % EH 1 lag sie in den Grenzen von  $13\text{ sec} \leq t_{Ta} \leq 300\text{ sec}$ . Parallel dazu wurde die Auslaufzeit mit dem 10 mm-Trichter bestimmt. Sie variierte zwischen  $10\text{ sec} \leq t_{Tr} \leq 76\text{ sec}$ . Bei Tauchzeiten über  $t_{Ta} > 160\text{ sec}$  nach dem Mischen wurde auf die Tauch- und Auslaufzeitmessung im Mörtelalter von  $t = 30\text{ min}$  und  $t = 60\text{ min}$  verzichtet.

Die Bilder A-4.5.1 - A-4.5.14 zeigen die Ergebnisse der Tauchversuche in Abhängigkeit der Zeit nach dem Mischen für die untersuchten Mörtel. Der für die Mörtelherstellung verwendete Zement ist in den Bildern angegeben. In den Bildern A-4.6.1 - 14 ist entsprechend die Auslaufzeit mit dem 10 mm-Trichter in Abhängigkeit der Zeit nach dem Mischen dargestellt.

#### 4.2.2 Ergebnisse zur Volumenänderung

Die Ergebnisse zur Volumenänderung sind für alle untersuchten Mörtel in Tab. A-4.4 zusammengestellt. Bei Verwendung der Einpreßhilfe EH 1 lag die Volumenänderung zwischen  $2,06 \leq \Delta V \leq 5,0 \%$ . Die Volumenänderung lag damit im zulässigen Bereich nach pr EN 445 ( $-1,0 \leq \text{zul. } \Delta V \leq +7,0 \%$ ). Gemäß DIN 4227, T. 5 war die zulässige Volumenänderung von  $\text{zul. } \Delta V \leq \pm 2,0 \%$  überschritten. Es muß berücksichtigt werden, daß die angegebenen Volumenänderungen nicht wie in DIN 4227, T. 5 vorgeschrieben, mit der Dose gemessen wurden, sondern mit Meßzylindern gemäß pr EN 445 und 447.

Bei Verwendung von EH 3 wurde die maximale Volumenänderung weit überschritten. Die Volumenänderung betrug  $\Delta V = 22,0 \%$ . Bild 5.1 zeigt die Volumenänderung für die Mörtel bei Verwendung der Zemente Z 1 bis Z 14 und EH 1. Bild 4.2 zeigt die Volumenänderung für zwei Mörtel, die mit unterschiedlicher Einpreßhilfe hergestellt wurden.

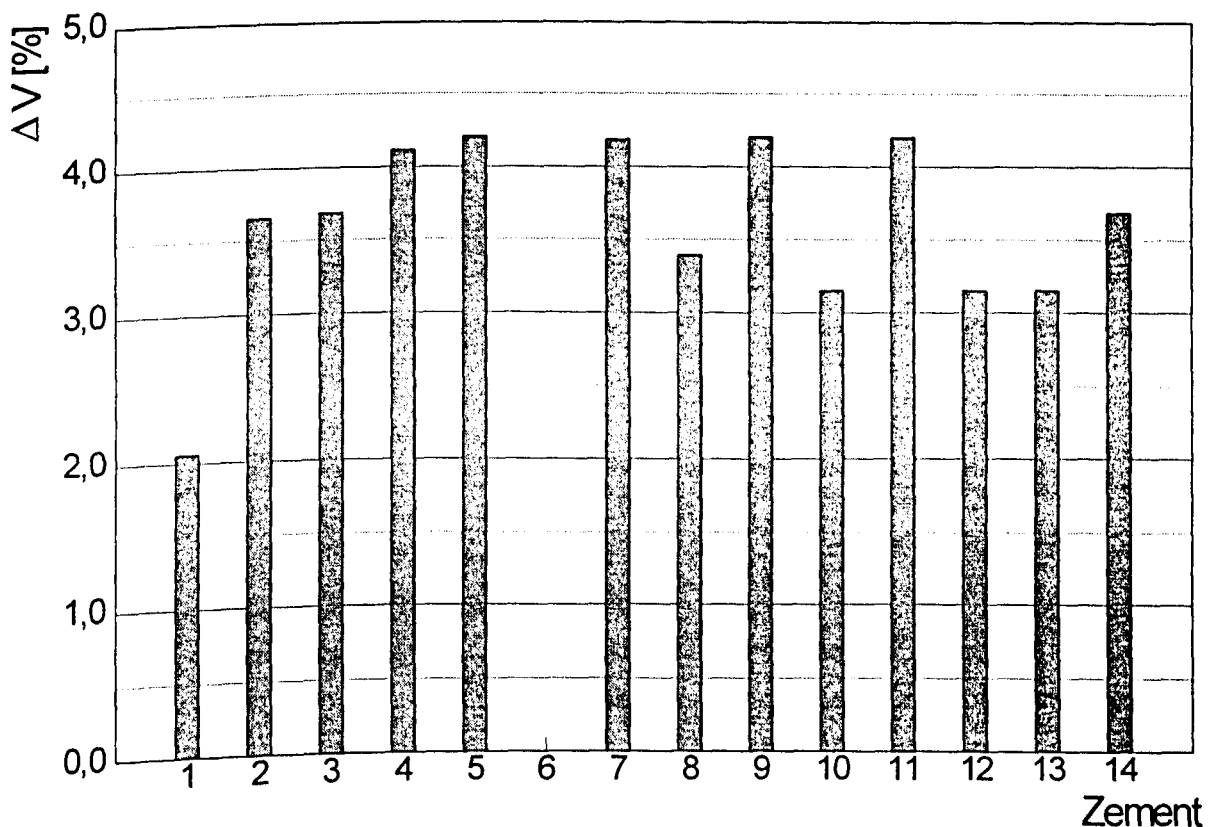


Bild 4.1: Volumenänderung der geprüften Mörtel der Standardrezeptur (Messung mit 1.000 ml Standzylinder)

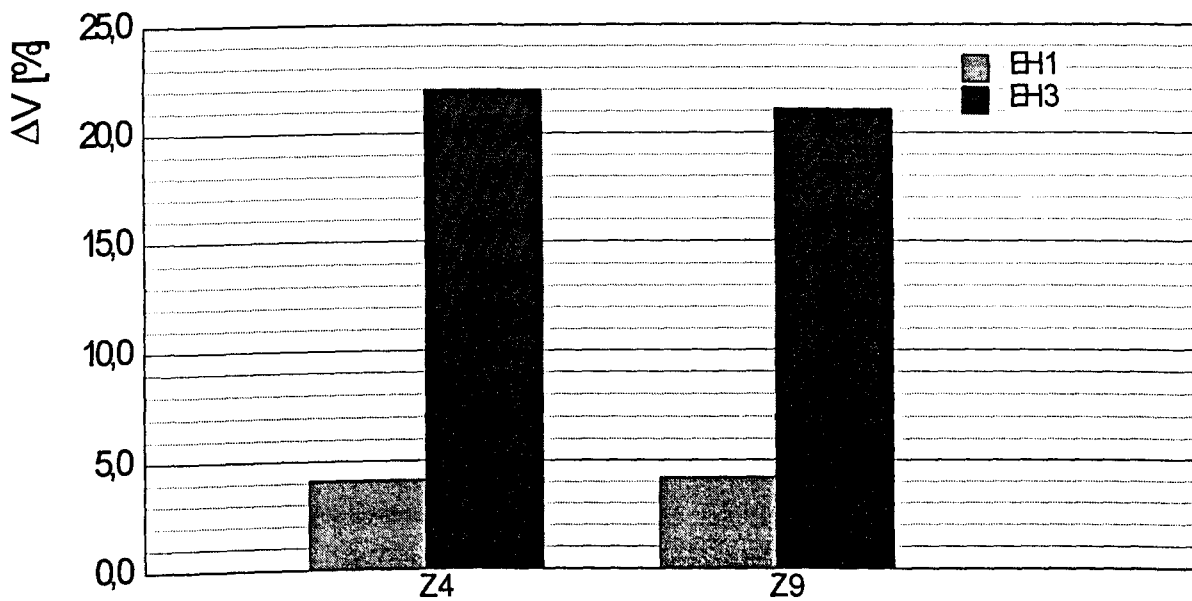


Bild 4.2: Volumenänderung für zwei Mörtel gleicher Rezeptur (Z 4 und Z 9, W/Z = 0,38, Mischer O), aber unterschiedlicher Einpreßhilfe

Die Versuche zeigen, daß die Volumenänderung  $\Delta V$  nicht in erster Linie vom Zement abhängt, sondern maßgeblich von der Quellwirkung der Einpreßhilfe bestimmt wird. Darüber hinaus haben Mischprinzip und Lagerungstemperatur in den ersten Stunden der Erhärtung Einfluß auf die Volumenänderung. Eine hohe Mischenergie, bzw. ein sehr guter Zementaufschluß ist vorteilhaft für die gute Quellwirkung. Weiterhin wird das Quellen durch eine hohe Lagerungstemperatur begünstigt.

#### 4.2.3 Ergebnisse zum Wasserabsondern

Die Ergebnisse zum Wasserabsondern sind für alle untersuchten Mörtel in Tab. A-4.4 zusammengestellt. Das Wasserabsondern  $\Delta V_w$  der Mörtel bei Verwendung der Zemente Z 1 - Z 14 ist im Bild 4.3 angegeben (Standardrezeptur).

Das Wasserabsondern war bei Verwendung der Zemente Z 2, Z 9, Z 10 und Z 14 am größten. Das Wasserabsondern hängt von Zement, Mischprinzip und der Lagerungstemperatur während des Erhärtens ab.

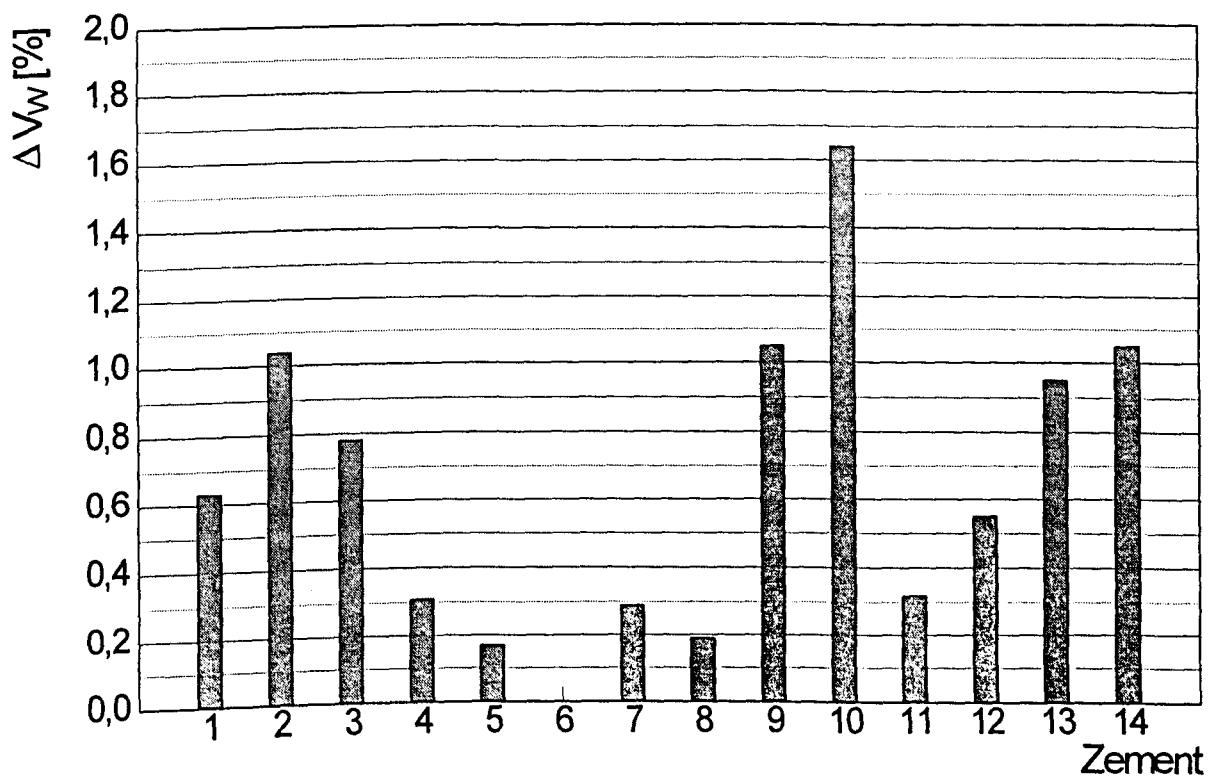


Bild 4.3: Wasserabsondern der geprüften Mörtel (Z 1 - Z 14, W/Z = 0,38; 1,0 % EH 1, Messung mit 1.000 ml Standzylinder)

#### 4.2.4 Wasserabsondern unter erhöhtem Druck

Wie in Kap. 3.5 beschrieben, wurde das Wasserabsondern zusätzlich bei erhöhtem Druck untersucht. Dazu diente ein durchsichtiges Druckrohr. In der ersten Stunde wurde im Druckrohr nicht signifikant mehr Wasser abgesondert als bei der Prüfung mit dem durchsichtigen Standzylinder ( $V = 1.000 \text{ ml}$ ). Beim Standzylinder begann die Wasserabsonderung üblicherweise erst  $t = 1,5 - 2 \text{ h}$  nach Mörtelherstellung. Die Versuche im durchsichtigen Druckrohr mußten jedoch nach  $t = 1 \text{ h}$  wegen Ansteifens des Mörtels abgebrochen werden.

#### 4.2.5 Zeitlicher Verlauf von Volumenänderung und Wasserabsondern

Nach pr EN 445 und pr EN 447 wird das Wasserabsondern  $t = 3 \text{ h}$  nach dem Mischen bestimmt. Gemäß DIN 4227, T. 5 darf nach  $t = 28 \text{ d}$  kein Wasser auf den Proben stehen. Die Volumenänderung ist nach  $t = 24 \text{ h}$  zu bestimmen.

Die Bilder 4.4 und 4.5 zeigen exemplarisch den zeitlichen Verlauf vom Volumenänderung und Wasserabsondern für zwei verschiedene Zemente. Die Volumenänderung ist ca. 3 h

nach dem Mischen abgeschlossen. Das Wasserabsondern läuft etwa zeitgleich ab. Es war bei allen Mörteln 3 - 4 h nach dem Mischen maximal. Von der dritten bis zur vierten Stunde wurde nur noch unwesentlich Wasser abgesondert. Nach 24 h war das Wasser wieder vom Mörtel aufgenommen, so daß kein Wasser mehr auf den Proben stand. Die Bestimmung des Wasserabsonderns im Mörtelalter von  $t = 24$  h oder  $t = 28$  d gemäß DIN 4227, T. 5 erfaßt somit nicht den ungünstigsten Fall.

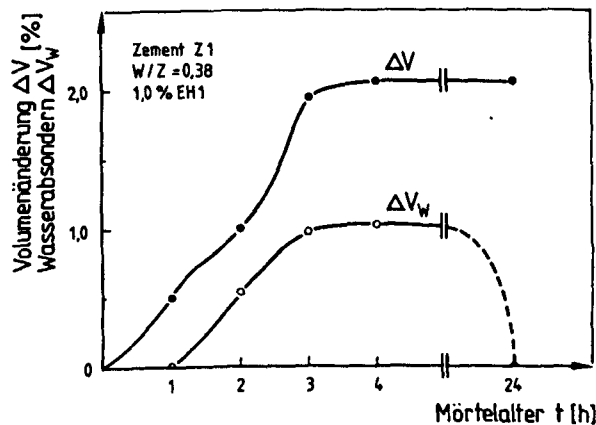


Bild 4.4: Volumenänderung und Wasserabsondern in Abhängigkeit der Zeit für Zement Z 1

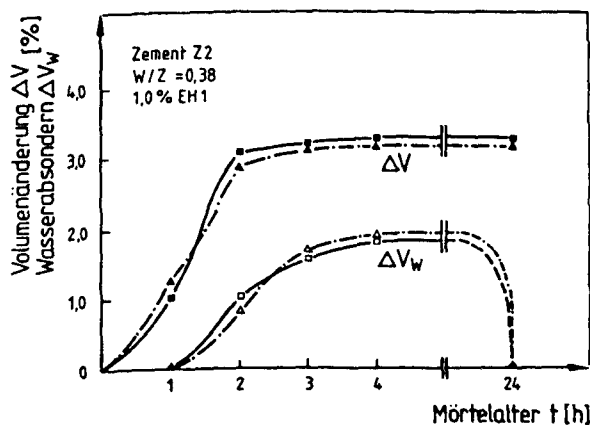


Bild 4.5: Volumenänderung und Wasserabsondern in Abhängigkeit der Zeit für Zement Z 2

Die Versuche belegen außerdem, daß die Volumenänderung im Mörtelalter von 3 - 4 h bestimmt werden kann. Sie ist zu diesem Zeitpunkt weitgehend abgeschlossen. Die Volumenzunahme bei Einpreßmörteln durch Quellmittel findet nur solange statt, wie der Mörtel noch weich ist. Eine weitere Volumenzunahme in der Erstarrungsphase findet nicht statt. Dieses wäre dann eine Volumenzunahme durch Treibwirkung, die u.U. mit einer Gefügeschädigung verbunden sein könnte.

Die Meßverfahren zur Bestimmung von Volumenänderung und Wasserabsondern mit durchsichtigen Zylindern haben sich bei den Versuchen im Labor und auf Baustellen gut bewährt. Für die genaue Bestimmung des Wasserabsonderns ist ein möglichst großes Ausgangsvolumen vorteilhaft. Der 1.000 ml Meßzylinder ist deswegen abweichend von pr EN 445 und pr EN 447 und in Anlehnung an die DASTb-Richtlinie [12] besonders zu empfehlen.

#### 4.2.6 Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung

Die Mörteldruckfestigkeit wurde im Alter von  $t = 28$  d an Zylindern gemäß DIN 4227, T. 5 geprüft. Die Versuchsergebnisse sind in Tab. A-4.4 angegeben. Die nach Norm erforderliche Zylinderdruckfestigkeit von  $f_{c,28d} \geq 30 \text{ N/mm}^2$  wurde von allen Proben erreicht. Die Druckfestigkeit ist bei üblichen Einpreßmörteln daher nicht als die kritische Größe anzusehen.

### 4.3 Ergebnisse der chemisch-physikalischen Zementuntersuchungen

#### 4.3.1 Überblick

Die Ergebnisse der Mörtelprüfungen belegen, daß besonders die Frischmörteleigenschaften vom verwendeten Zement abhängen. Die verwendeten Zemente wurden deswegen hinsichtlich ihrer chemisch-physikalischen Eigenschaften untersucht. Dabei wurde nach Zusammenhängen zwischen Zement- und Frischmörteleigenschaften gesucht, um anhand der Zementeigenschaften auf die Frischmörteleigenschaften zu schließen.

#### 4.3.2 Ergebnisse der chemischen Analysen

Tab. A-4.1 zeigt die Ergebnisse der naß-chemischen Zementanalysen. Die Klinkerphasen wurden nach Bogue aus der chemischen Bestandteilen nach Gl. (4.1) - (4.4) berechnet [50]:

$$C_3S = 4,0710 \text{ CaO} - 7,6024 \text{ SiO}_2 - 1,4297 \text{ Fe}_2\text{O}_3 - 6,7189 \text{ Al}_2\text{O}_3 - 2,852 \text{ SO}_3 \quad (4.1)$$

$$C_2S = 2,8675 \text{ SiO}_2 - 0,7544 \text{ C}_3S \quad (4.2)$$

$$C_3A = 2,6504 \text{ Al}_2\text{O}_3 - 1,6920 \text{ Fe}_2\text{O}_3 \quad (4.3)$$

$$C_4AF = 3,0432 \text{ Fe}_2\text{O}_3 \quad (4.4)$$

Klinkerbestandteile in Gewichtsprozent

Weiterhin wurde das Alkali-Äquivalent bestimmt [38]. In der Tabelle sind außerdem Reindichten, spezifische Oberflächen und Blaine-Werte für die jeweiligen Zemente angegeben.

Tab. A-4.2 zeigt die Ergebnisse der chemischen Zusammensetzung ermittelt mit der Röntgenfloreszenz-Analyse (RFA). Die Klinkerphasen wurden ebenso nach dem Modell von Bogue [50] bestimmt. Zur Korrelation zwischen Zementzusammensetzung und Mörtelfließfähigkeit sind am Tabellenende die Tauchzeiten nach dem Mischen für die Mörtel der Standardrezeptur ( $W/Z = 0,38$ , 1,0 % EH 1,  $T = 20\text{ °C}$ , Mischer O) angegeben, die mit dem jeweiligen Zement hergestellt wurden. In den Bildern A-4.7.1 - A-4.7.6 sind die wesentlichen chemischen Bestandteile für die untersuchten Zemente aus naß-chemischer Analyse und RFA vergleichend dargestellt. Die Ergebnisse beider Analysen sind nicht deckungsgleich. Die größten analysenbedingten Unterschiede treten bei Zement Z 11 beim CaO- und  $K_2O$ -Gehalt auf.

Zement Z 10 ist als  $C_3A$ -freier Zement ausgewiesen. Er unterscheidet sich in chemischer Zusammensetzung ( $Fe_2O_3$ ,  $Al_2O_3$  und  $K_2O$ -Gehalt) sowie  $Na_2O$ -Äquivalent deutlich von den übrigen Zementen. Die Bilder 4.6.1 - 4.6.4 zeigen die berechneten Klinkerphasen nach Bogue auf der Basis von naß-chemischer Analyse und RFA im Vergleich.

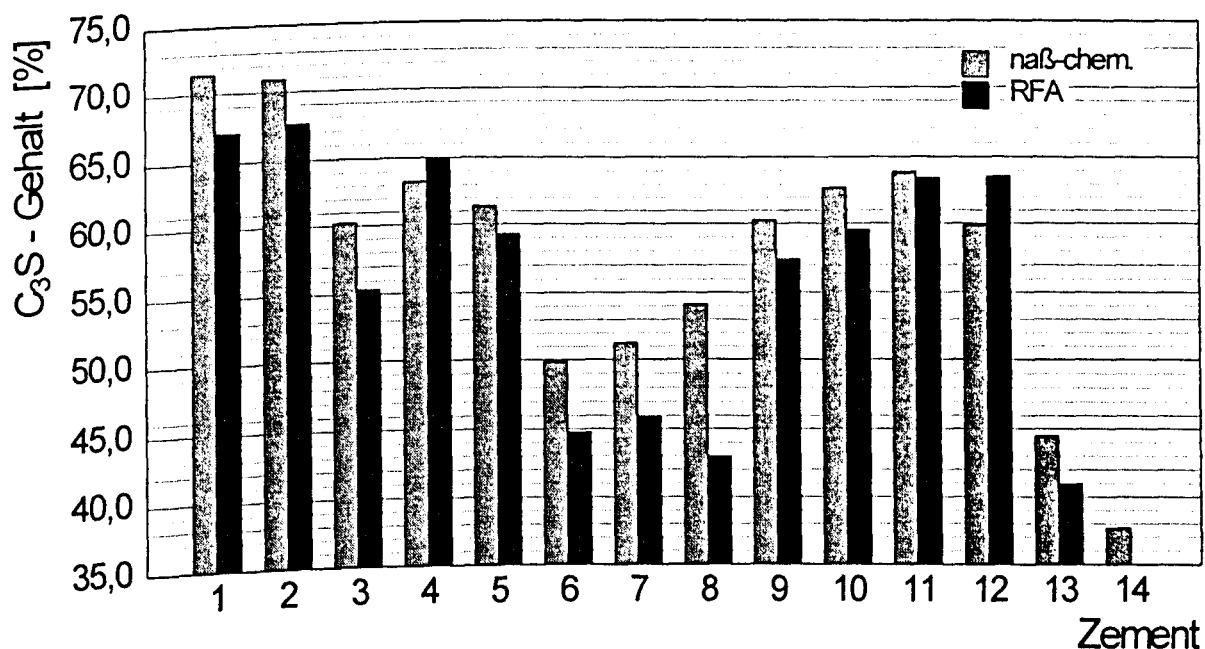


Bild 4.6.1:  $C_3S$ -Gehalt der Zemente nach Bogue (Basis: naß-chemische Analyse und RFA)



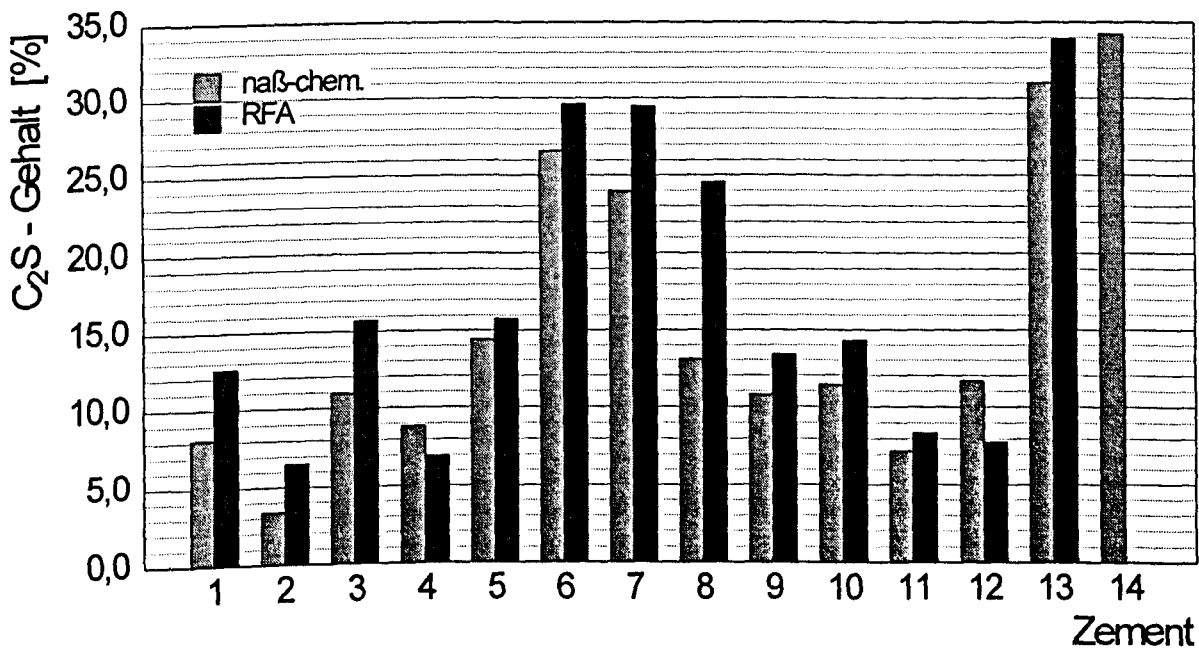


Bild 4.6.2:  $C_2S$ -Gehalt der Zemente nach Bogue (Basis: naß-chemische Analyse und RFA)

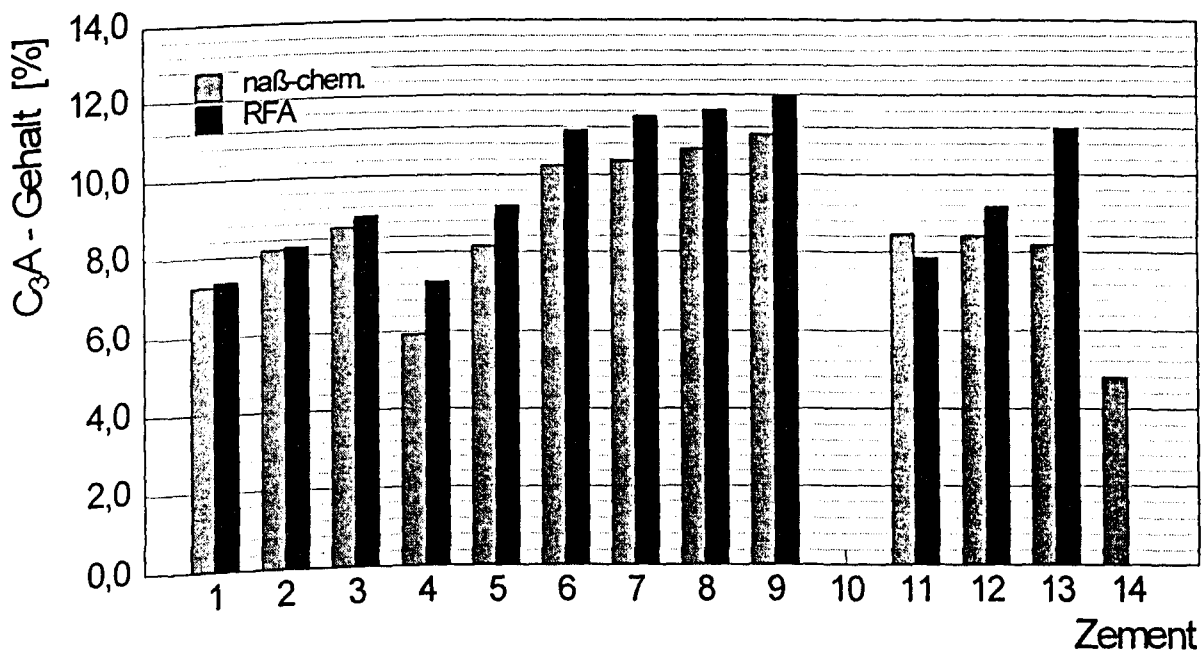


Bild 4.6.3:  $C_3A$ -Gehalt der Zemente nach Bogue (Basis: naß-chemische Analyse und RFA)

Basierend auf den beiden Analysen (naß-chemisch und RFA) ergeben sich z.T. deutliche Unterschiede in den Klinkerphasen. Bei den Zementen Z 1, Z 3, Z 6, Z 7 und Z 8 schwanken die berechneten  $C_3S$ -Gehalte erheblich. Die größten Unterschiede im  $C_2S$ -Gehalt ergeben sich bei den Zementen Z 1, Z 3, Z 7 und Z 8. Bei  $C_4AF$  und  $C_3A$  sind die Unterschiede aufgrund der beiden unterschiedlichen Analysemethoden weit weniger ausgeprägt. Die

teilweise deutlichen Unterschiede bei  $C_3S$ - und  $C_2S$ -Gehalten resultieren in erster Linie aus den Unterschieden beim  $CaO$ -Gehalt. Geringe Schwankungen im  $CaO$ -Gehalt bei der Analyse haben große Änderungen beim berechneten  $C_3S$ -Gehalt zur Folge. In den  $C_2S$ -Gehalt geht der  $CaO$ -Gehalt indirekt über den  $C_3S$ -Gehalt ein, Gl. (4.2). Schwankungen im  $CaO$ -Gehalt wirken sich dadurch nicht so deutlich auf den  $C_2S$ -Gehalt aus.  $C_3A$ - und  $C_4AF$ -Gehalt hängen nur vom Aluminium- und Eisengehalt ab, Gl. (4.3) und Gl. (4.4). Die Schwankungen dieser beiden Anteile sind in den Analysen relativ gering. Die Übereinstimmung der berechneten  $C_3A$ - und  $C_4AF$ -Gehalte auf der Basis unterschiedlicher Analysemethoden ist deswegen besser als beim  $C_2S$ - und  $C_3S$ -Gehalt.

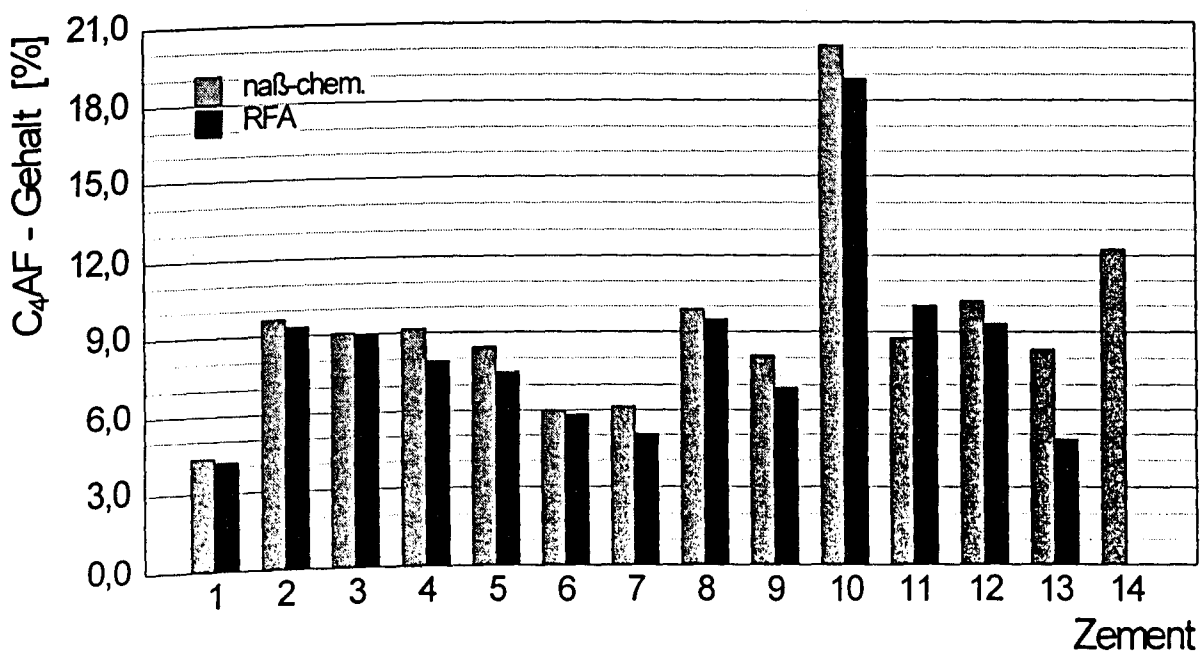


Bild 4.6.4:  $C_4AF$ -Gehalt der Zemente nach Bogue (Basis: naß-chemische Analyse und RFA)

### 4.3.3 Zusammenhang zwischen Zement- und Mörtелеigenschaften

#### 4.3.3.1 Einfluß von $C_3A$ -Gehalt und $C_3A$ -Reaktivität

In der Literatur wird berichtet, daß  $C_3A$ - und Gipsgehalt entscheidend für die Fließfähigkeit vom Einpreßmörteln sind [51], [52]. Es wird deswegen empfohlen, für die Herstellung von Einpreßmörteln, Zemente mit geringem  $C_3A$ -Gehalt zu verwenden.

Für die Anfangsreaktion ist neben dem  $C_3A$ -Gehalt der Sulfatgehalt des Zementes entscheidend. Nach der Wasserzugabe reagiert das  $C_3A$  mit Sulfat zu Ettringit (Trisulfat). Das Ettringit bildet eine Hülle um das Zementkorn und verhindert zunächst den weiteren

Reaktionsfortschritt. Es tritt eine Ruhephase von 1 - 3 h ein. Erst danach beginnt das Erstarren des Zementleims [59], [60].

Manns et. al. [62] haben bei ihren Versuchen an Einpreßmörteln einen Zement mit geringem  $C_3A$ -Gehalt verwendet. Bei dem Zement war gleichzeitig der Alkaligehalt gering. Anhand der Versuche ließ sich kein eindeutiger Zusammenhang zwischen der chemisch-mineralogischen Zementzusammensetzung und den Mörtелеigenschaften herstellen. Außerdem variierten bei den Versuchen die Mörtелеigenschaften, da der Zement aus unterschiedlichen Lieferchargen stammte.

Basierend auf der naß-chemischen Analyse zeigt Bild 4.7 den Zusammenhang zwischen  $C_3A$ -Gehalt und Tauchzeit nach dem Mischen für die hier ausgeführten Mörtelversuche ( $W/Z = 0,38$ , 1,0 % EH 1). Die Werte für  $C_3A$ -Gehalte und Tauchzeiten sind in Tab A-4.1 zusammengefaßt.

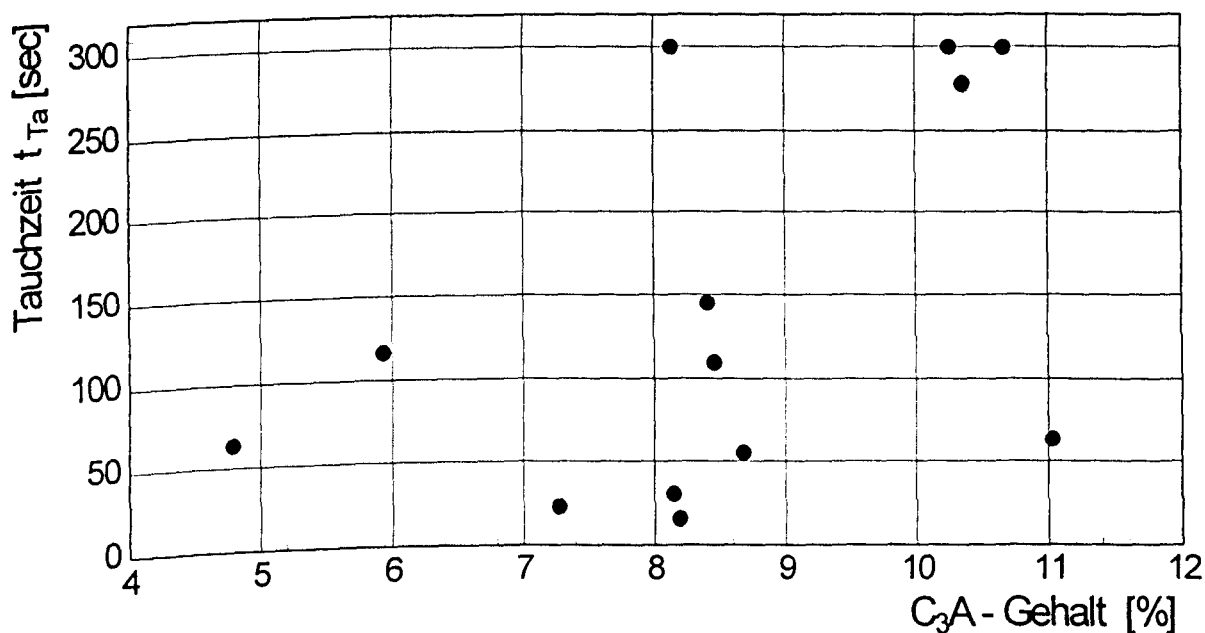


Bild 4.7: Zusammenhang zwischen  $C_3A$ -Gehalt und Tauchzeit nach dem Mischen (Basis: naß-chemische Analyse;  $W/Z = 0,38$ )

Die in der Literatur [51], [52], [62] beschriebene Korrelation zwischen  $C_3A$ -Gehalt und Tauchzeit nach dem Mischen wird durch die Versuche nicht vollständig bestätigt. Die Zemente Z 6, Z 7 und Z 8 besitzen einen vergleichsweise hohen  $C_3A$ -Gehalt ( $> 10,0$  M.-%). Die mit diesen Zementen hergestellten Mörteln zeigten eine schlechte Fließfähigkeit. Die Tauchzeiten waren entsprechend hoch. Zement Z 5 hatte zwar einen ähnlich niedrigen  $C_3A$ -Gehalt wie Z 3, dennoch war er ebenso schlecht fließfähig wie Mörtel mit Zementen Z 6, Z 7 und Z 8. Zement Z 4 hatte demgegenüber einen ausgesprochen geringen  $C_3A$ -Gehalt. Die

Tauchzeit bei diesem Mörtel war mit  $t_{Ta} = 280$  sec nach dem Mischen jedoch unerwartet hoch. Der hohe  $C_3A$ -Gehalt bei Zement Z 9 ließ eine sehr schlechte Fließfähigkeit erwarten. Die Tauchzeit von  $t_{Ta} = 55$  sec lag jedoch im Rahmen der Norm.

Zur Überprüfung des Einflusses vom  $C_3A$ -Gehalt auf die Fließfähigkeit wurde ein rechnerisch  $C_3A$ -freier Zement (HS-Zement,  $C_3A$ -frei) verwendet (Z 10). Der mit diesem Zement hergestellte Mörtel zeigte nach dem Mischen eine gute Fließfähigkeit. Die Tauchzeit betrug  $t_{Ta} = 21,4$  sec. Dieses Ergebnis unterstützt den bereits erwähnten Zusammenhang zwischen  $C_3A$ -Gehalt und Fließfähigkeit [51], [52]. Im Vergleich zu Mörtel mit Zement Z 1 stieg die Tauchzeit innerhalb der ersten Stunde nach dem Mischen jedoch rasch an (Z 1:  $t_{Ta}(60 \text{ min}) = 79$  sec; Z 10:  $t_{Ta}(60 \text{ min}) = 169$  sec).

Neben dem  $C_3A$ -Gehalt wurde die  $C_3A$ -Reaktivität untersucht. Zunächst wurde der  $C_3A$ -Gehalt nach Bogue aus der chemischen Analyse (RFA) bestimmt. Anschließend wurde der  $C_3A$ -Gehalt des Zementes aus der röntgendiffraktometrischen Untersuchung ermittelt. Dieser Wert stellte den Ausgangswert dar.

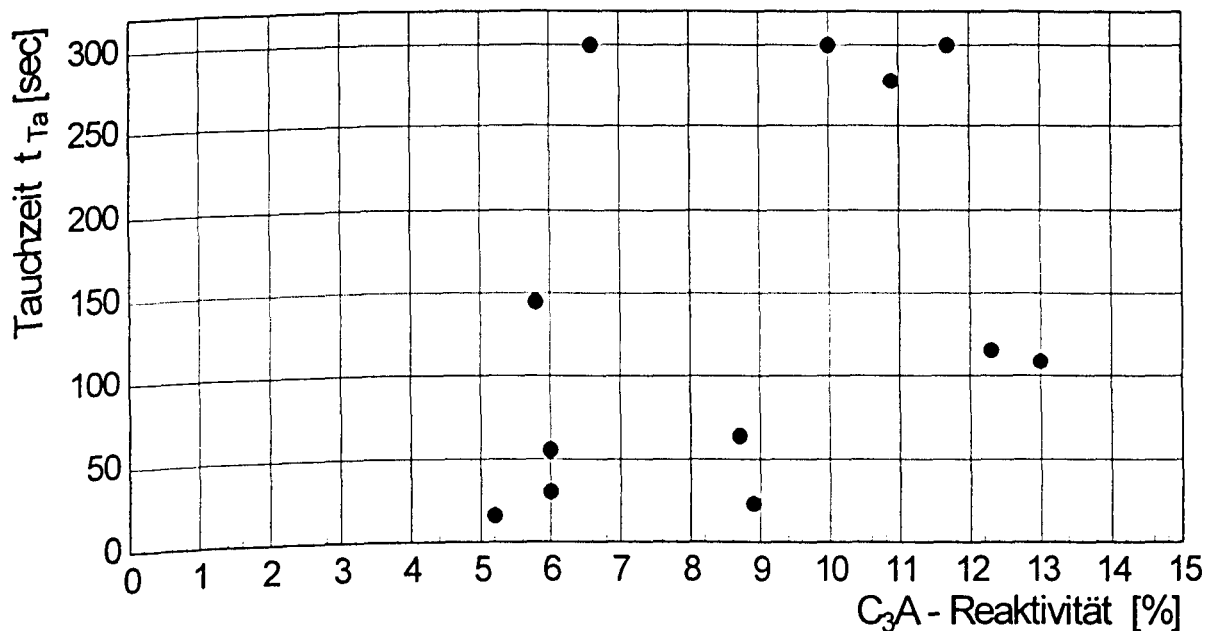


Bild 4.8: Tauchzeit nach dem Mischen in Abhängigkeit der  $C_3A$ -Reaktivität

Nachfolgend wurde Zementmörtel mit einem festen W/Z-Wert hergestellt. Die Hydratation wurde nach 15 Minuten mit Isopropanol abgebrochen. Der hydratisierte Mörtel wurde mit dem Röntgendiffraktometer untersucht. Die Fläche unter dem  $C_3A$ -Peak wurde ermittelt und mit der Fläche des Ausgangspeakes vom Zement verglichen. Aus der Vergrößerung des Peaks ergibt sich die  $C_3A$ -Reaktivität. Die Ergebnisse der  $C_3A$ -Reaktivität sind in Tab. A-4.3

für alle Zemente zusammengefaßt. Im Bild 4.8 ist die Tauchzeit des Standardmörtels (W/Z = 0,38, 1,0 % EH 1) in Abhängigkeit der C<sub>3</sub>A-Reaktivität aufgetragen.

Die Tauchzeit nach dem Mischen steigt mit der C<sub>3</sub>A-Reaktivität des Zementes an. Eine große C<sub>3</sub>A-Reaktivität deutet auf eine schnelle Anfangsreaktion hin. Der Mörtel steift dadurch schnell an. Die Bestimmung der C<sub>3</sub>A-Reaktivität ist in bezug auf die zu erwartenden Fließfähigkeit eine aussagekräftige Größe.

4.3.3.2    Einfluß des SO<sub>3</sub>-Gehaltes

Wie oben dargestellt, ist für die anfängliche Ettringitbildung neben dem C<sub>3</sub>A-Gehalt auch der SO<sub>3</sub>-Gehalt entscheidend. Aus Versuchen folgerten Richartz et al. [59], [60], daß der Verzögerungsgrad bis zum Erstarren von der C<sub>3</sub>A-Menge abhängt, die vor der Ruhephase in Lösung geht und als Ettringit gebunden wird. Das bedeutet, daß die erforderliche Sulfatmenge auf die C<sub>3</sub>A-Reaktivität abgestimmt sein muß. Die Löslichkeit der im Zement auftretenden Sulfatprodukte ist jedoch unterschiedlich. Tab 4.1 zeigt die Löslichkeit der Sulfatprodukte im Vergleich [59], [60].

Tab. 4.1:      Unterschiedliche Bindungsarten des Sulfates und deren Löslichkeit

Sulfat-Art	chem. Zusammensetzung	Löslichkeit
Gips	CaSO <sub>4</sub> · 2 H <sub>2</sub> O	schlecht löslich
Halbhydrat	CaSO <sub>4</sub> · 1/2 H <sub>2</sub> O	besser löslich
lösl. Anhydrit III	CaSO <sub>4</sub>	besser löslich
natürl. Anhydrit II	CaSO <sub>4</sub>	schlecht löslich

Für die schnelle Löslichkeit der Sulfate ist es vorteilhaft, wenn diese nicht in Form von Gips, sondern als Halbhydrat oder lösl. Anhydrit vorliegen. Die Sulfatkonzentration in der Lösung ist bei großen Mengen Halbhydrat und lösl. Anhydrit größer als bei Gips-Zusatz. Bei Gips-Zusatz kann das Sulfatangebot in der Lösung nicht ausreichend sein, um das bis zur Ruheperiode in Lösung gegangene C<sub>3</sub>A in Form von Ettringit zu binden. Die erstarrungsverzögernde Wirkung des Sulfates (SO<sub>3</sub>) hängt demnach nicht nur von der Menge, sondern auch von der Art der Reaktionsprodukte ab [59], [60].

Welche Art von Sulfatprodukten im Zement vorliegt, hängt u.a. davon ab, bei welcher Temperatur das Sulfat dem Zement vor dem Mahlen zugegeben werden. Wird dem Zement Gips bei einer Temperatur T > 80 °C zugegeben, wird das Wasser aus dem vergleichsweise schlecht löslichen Gips ausgetrieben, so daß besser lösliches Halbhydrat entsteht. Es sind

keine Versuchsergebnisse bekannt, die gezielt Aufschluß über die Wirkung von  $C_3A$ -Gehalt, Sulfatgehalt sowie den Sulfatprodukten auf die Frischmörteleigenschaften von Einpreßmörteln geben.

In Bild 4.9 ist der Zusammenhang zwischen  $SO_3$ -Gehalt und Tauchzeit nach dem Mischen für die hier ausgeführten Mörtelversuche aufgetragen. Ein eindeutiger Zusammenhang ist nicht erkennbar.

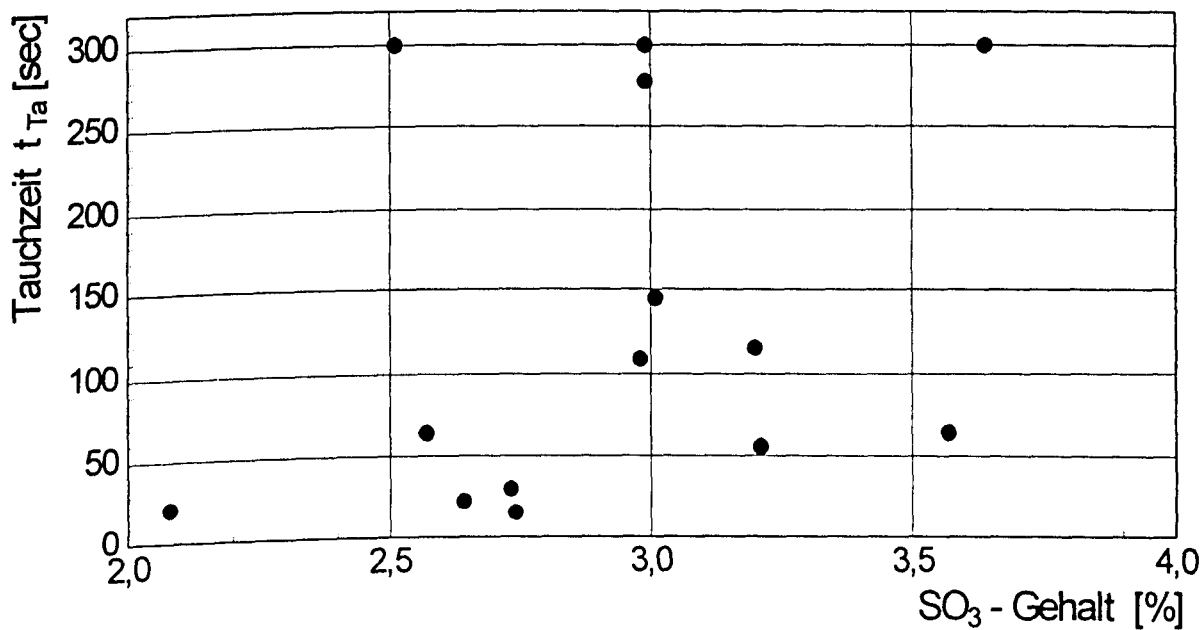


Bild 4.9: Zusammenhang zwischen  $SO_3$ -Gehalt und Tauchzeit nach dem Mischen (Basis: naß-chemische Analyse; W/Z = 0,38)

Bei Betrachtung der Formeln zur Bestimmung der Klinkerphasen fällt auf, daß der Sulfatgehalt in die Bestimmung vom  $C_3A$ -Gehalt nicht eingeht. Dennoch eine genaue Abstimmung beider Gehalte aufeinander wichtig. Der optimale  $SO_3$ -Gehalt läßt sich in Abhängigkeit vom  $C_3A$ -Gehalt nach Gl. (4.5) ermitteln [38].

$$\text{opt. } SO_3 = 0,789 + 0,1149 C_3A + 1,872 \text{ Na}_2O\text{-Äquivalent} \quad [\text{M.}\%] \quad (4.5)$$

In Bild 4.10 sind die Verhältnisse von vorhandenen zu optimalen  $SO_3$ -Gehalten für die untersuchten Zemente aufgetragen. Die Verhältnisse wurden auf der Grundlage von naß-chemischer Analyse und RFA bestimmt.

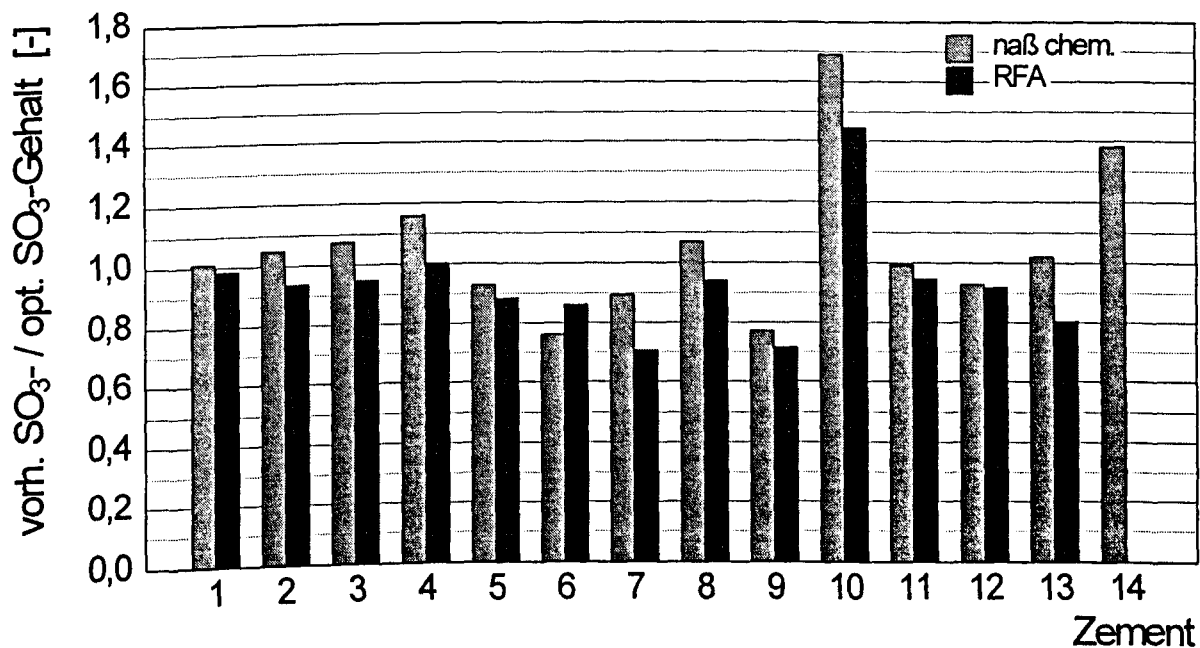


Bild 4.10: Verhältnis von vorhandenen zu optimalen SO<sub>3</sub>-Gehalten der Zemente

Bei den Zementen Z 1, Z 2, Z 3, Z 4 und Z 8 war das Verhältnis

$$\frac{\text{vorh. SO}_3}{\text{opt. SO}_3} \approx 1,0 \quad (4.6).$$

Dabei fällt auf, daß das Verhältnis auf der Grundlage der naß-chemischen Analyse bei den meisten Zementen größer war als auf der Basis der RFA.

Bei den Zementen Z 5, Z 6, Z 7, Z 9 und Z 12 war das Verhältnis von vorh. SO<sub>3</sub> / opt. SO<sub>3</sub> < 1,0. Die mit diesen Zementen hergestellten Mörtel waren vergleichsweise schlecht fließfähig. Bei den Zementen Z 1, Z 2, Z 3 und Z 10 war der vorhandene SO<sub>3</sub>-Gehalt deutlich größer als der optimale SO<sub>3</sub>-Gehalt. Mörtel, die mit diesen Zementen hergestellt wurden, zeigten eine gute Fließfähigkeit nach dem Mischen ( $t_{Ta} < 55$  sec).

Bei Verwendung der Zemente Z 5, Z 6 und Z 7 wurde nach dem Mischen eine Tauchzeit von  $t_{Ta} = 300$  sec gemessen. Bei diesen Zementen war der vorhandene SO<sub>3</sub>-Gehalt kleiner als der erforderliche SO<sub>3</sub>-Gehalt. Bei den Zement Z 4 und Z 8 war der vorhandene SO<sub>3</sub>-Gehalt größer als der erforderliche. Die Fließfähigkeit des Mörtels nach dem Mischen war jedoch nicht ausgesprochen gut.

#### 4.3.3.3 Einfluß des Alkaligehaltes

Bei der naß-chemischen Analyse lag der Gehalt an  $K_2O$  zwischen 0,42 und 0,92 M.-%; der  $Na_2O$ -Gehalt schwankte zwischen 0,09 und 0,35 M.-%. Der Alkaligehalt aus  $Na_2O$  und  $K_2O$  läßt sich durch das Alkali-Äquivalent der Gesamtalkalien ausdrücken, Gl. (4.7) [38].

$$Na_2O\text{-Äquivalent} = 0,658 \cdot K_2O + Na_2O \text{ [M.-%]} \quad (4.7).$$

Bild 4.11 zeigt die nach Gl. (4.7) berechneten  $Na_2O$ -Äquivalente auf der Basis von naß-chemischer Analyse und RFA. Die Ergebnisse sind nicht deckungsgleich. Die Tendenzen sind jedoch erkennbar. Zement Z 1 und Z 2 hatten vergleichsweise geringe  $Na_2O$ -Äquivalente, während Zement Z 4 - Z 9 sowie Z 11 und Z 12 hohe  $Na_2O$ -Äquivalente aufwiesen. Das geringste  $Na_2O$ -Äquivalent hatte der  $C_3A$ -freie Zement Z 10.

In Bild 4.12 sind die  $Na_2O$ -Äquivalente den Tauchzeiten nach Mischen gegenübergestellt. Bei einem niedrigen  $Na_2O$ -Äquivalent war die Tauchzeit des Mörtels nach dem Mischen geringer als bei hohem  $Na_2O$ -Äquivalent.

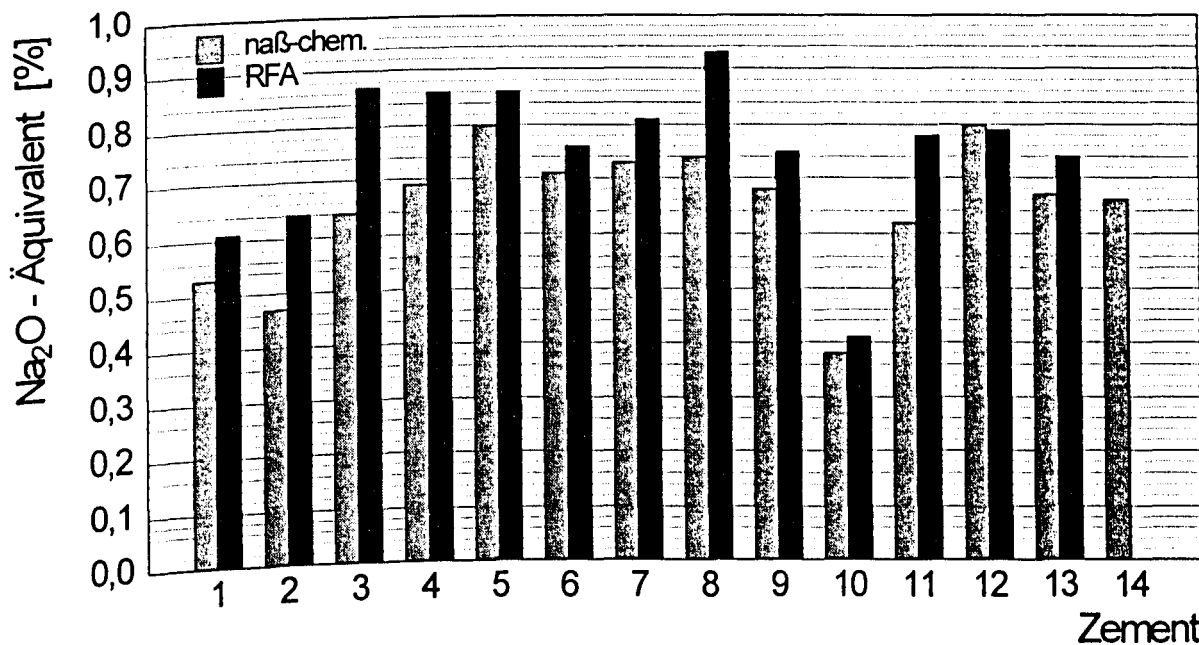


Bild 4.11: Berechnete  $Na_2O$ -Äquivalente auf der Basis von naß-chem. Analyse und RFA

Die Zementen Z 1, Z 2 und Z 10 hatten ein niedriges  $Na_2O$ -Äquivalent (Basis: naß-chemische Analyse). In diesen Fällen war die Tauchzeit entsprechend klein. Bei den Zementen Z 3, Z 9, Z 11 und Z 14 lag das  $Na_2O$ -Äquivalent zwischen 0,66 und 0,69 M.-%; die Tauchzeiten nach den Mischen schwankten zwischen  $t_{Ta} = 55$  und 109 sec. Die



Zemente Z 4, Z 5, Z 6, Z 7 und Z 8 hatten ein  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent  $\geq 0,69$  M.-%. Die zugehörigen Tauchzeiten betrugen bei einem W/Z-Wert von  $W/Z = 0,38$   $t_{\text{Ta}} \geq 240$  sec.

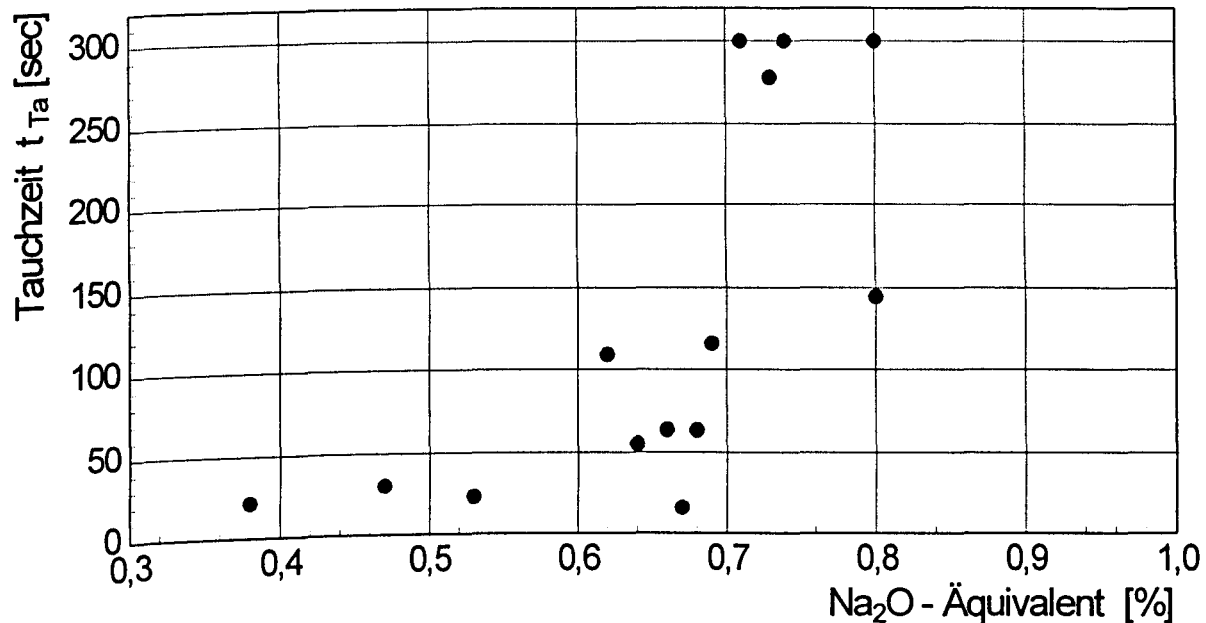


Bild 4.12: Zusammenhang zwischen Alkali-Äquivalent und Tauchzeit nach dem Mischen (Basis: naß-chemische Analyse, einheitliche Mörtelherstellung)

Aus den Ergebnissen läßt sich ableiten, daß ein hoher Alkali-Gehalt, bzw.  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent, des Zementes mit einer hohen Tauchzeit des Frischmörtels verbunden ist. Das heißt, daß mit steigendem Alkali-Gehalt eine schnelle Anfangsreaktion einsetzt, die zu einem schnellen Ansteifen des frischen Mörtels in den ersten Minuten nach Wasserzugabe führt.

Dem Einfluß des Alkali-Gehaltes auf die Fließfähigkeit nach dem Mischen wurde durch einen Versuch gezielt nachgegangen. Für den Versuch wurde Zement Z 1 mit einem W/Z-Wert = 0,38 und 1,0 M.-% EH in einem Kolloidalmischer hergestellt. Für die erste Mischung wurde übliches Leitungswasser verwendet. Die Tauchzeit nach dem Mischen betrug  $t_{\text{Ta}} = 31$  sec.

Für die zweite Mischung wurde das Anmachwasser teilweise durch eine Alkalilösung ersetzt. Der W/Z-Wert des Mörtels blieb mit  $W/Z = 0,38$  unverändert. Für die Herstellung der Alkalilösung wurde der Alkaligehalt von Zement Z 5 zu Grunde gelegt. Das  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent des Frischmörtels wurde von  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äqui. = 0,53 auf 0,80 M.-% angehoben.

Bei dem modifizierten Mörtel zeigte sich schon im Mischer eine deutlich steifere Mörtelkonsistenz als bei der Ausgangsmischung ohne Alkalilösung. Die Tauchzeit nach dem Mischen betrug bei Zugabe der Alkali-Lösung  $t_{\text{Ta}} = 225$  sec. Auf die Bestimmung der

Tauchzeit 30 min nach dem Mischen wurde verzichtet. Bild 4.13 zeigt den Einfluß des Alkaligehaltes auf die Tauchzeit.

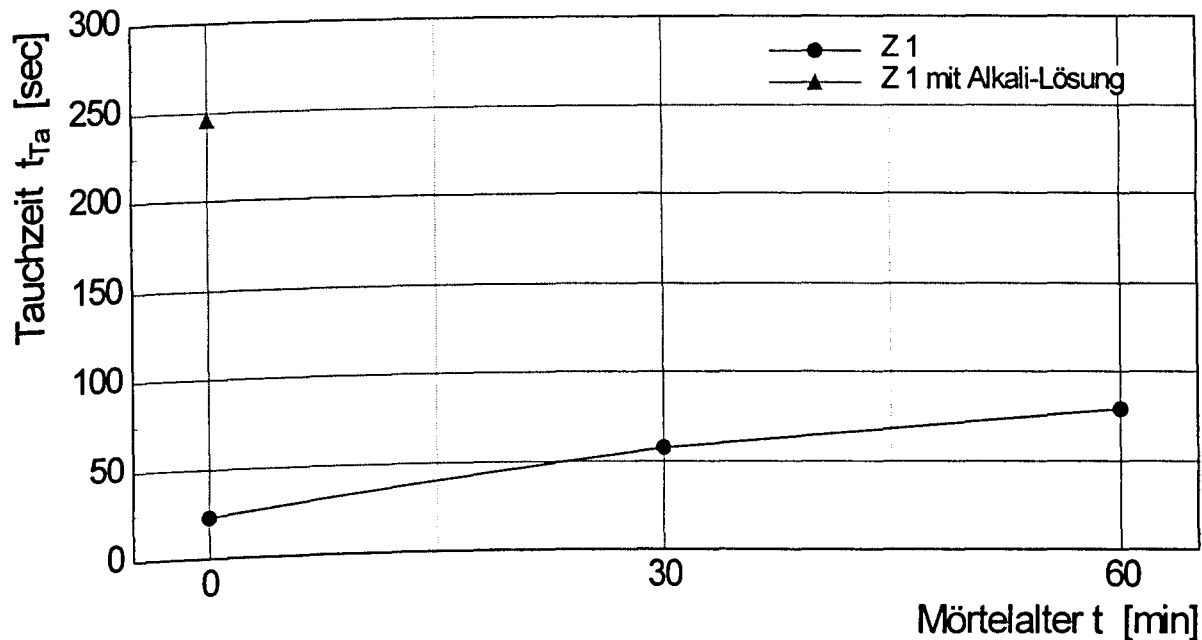


Bild 4.13: Einfluß des Alkaligehaltes auf die Tauchzeit; Mörtel mit Zement Z 1 hergestellt; Änderung des Alkaligehaltes durch Alkalilösung

Bei den Ergebnissen muß berücksichtigt werden, daß bereits bei der Zementzugabe ein hoher Alkalianteil gelöst im Wasser vorlag. Bei der Zementzugabe in Leitungswasser werden die Alkalien demgegenüber allmählich gelöst. Der pH-Wert des Frischmörtels war deswegen in den ersten Minuten größer als bei Zementzugabe in Leitungswasser. Der Einfluß der Alkalien auf eine schnelle Anfangsreaktion wurde so möglicherweise noch verstärkt.

Fleischer [38] fand in seinen Untersuchungen, daß mit steigendem  $\text{Na}_2\text{O}$ -Gehalt der  $\text{C}_3\text{S}$ -Gehalt abnimmt und der  $\text{C}_2\text{S}$ -Gehalt entsprechend zunimmt. Dieser Zusammenhang wird durch die hier untersuchten Zemente bestätigt. Bei geringem Alkaligehalt war auch der  $\text{C}_2\text{S}$ -Gehalt niedrig, obwohl der Alkali-Gehalt in die Phasenberechnung nach Bogue nicht eingeht. Demzufolge ist zu vermuten, daß ein Zusammenhang zwischen  $\text{C}_3\text{S}$ ,  $\text{C}_2\text{S}$ -Gehalt und der Tauchzeit bestehen.

#### 4.3.3.4 Einfluß von $\text{C}_2\text{S}$ -, $\text{C}_3\text{S}$ - und $\text{C}_4\text{AF}$ -Gehalt

Die  $\text{C}_2\text{S}$ -Phase nimmt an der chemischen Reaktion erst später teil (Alter  $t > 6$  h). Auf die Anfangsreaktion und die Fließfähigkeit kann der  $\text{C}_2\text{S}$ -Gehalt eigentlich keinen Einfluß haben. Im Bild 4.14 ist der Zusammenhang zwischen  $\text{C}_2\text{S}$ -Gehalt und der Tauchzeit nach dem Mischen dargestellt.

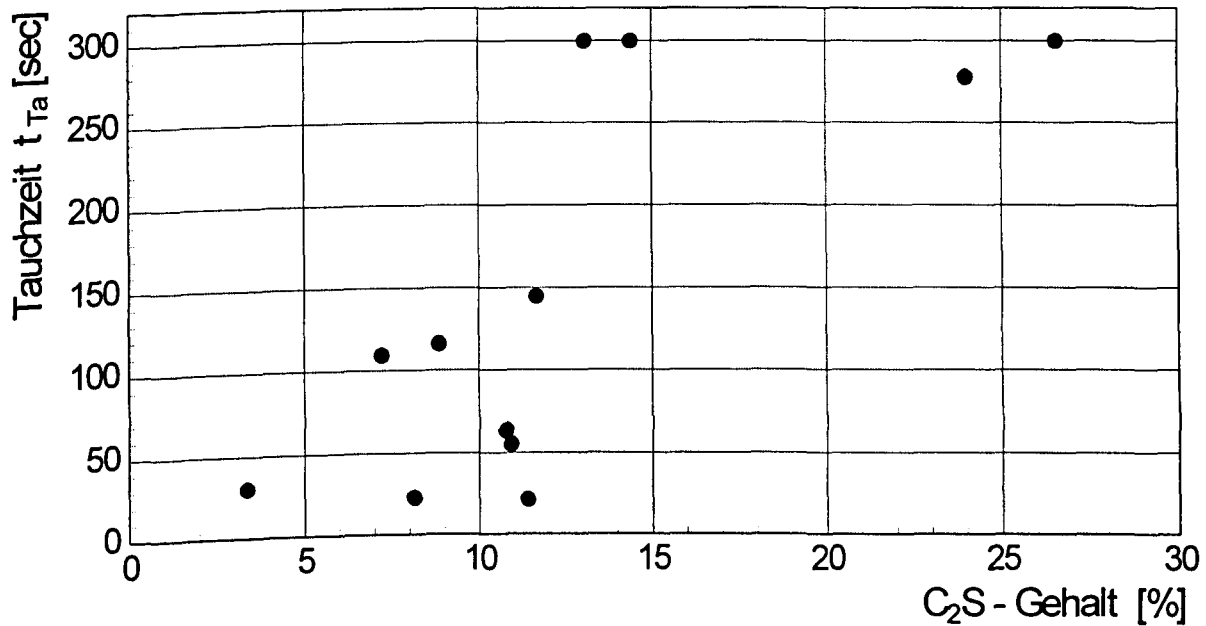


Bild 4.14: Zusammenhang zwischen C<sub>2</sub>S-Gehalt und Tauchzeit nach dem Mischen  
(Basis: naß-chemische Analyse)

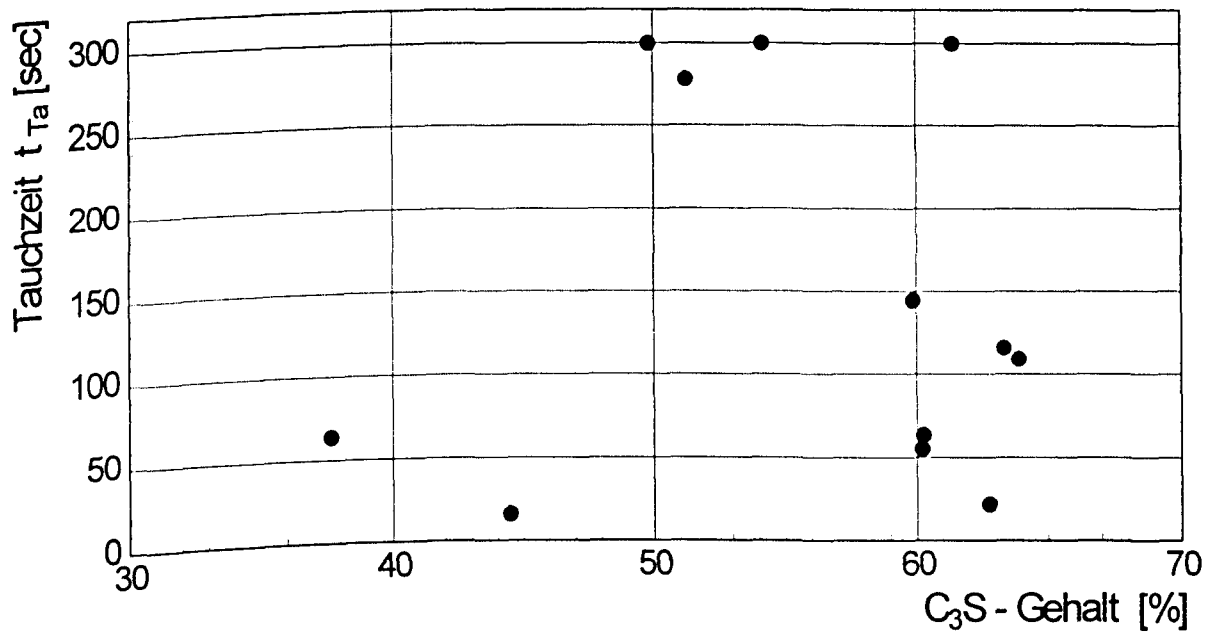


Bild 4.15: Zusammenhang zwischen C<sub>3</sub>S-Gehalt und Tauchzeit nach dem Mischen  
(Basis: naß-chemische Analyse)

Bei den Mörteln, bei denen ein Zement mit einem hohen C<sub>2</sub>S-Gehalt verwendet wurde, traten nach dem Mischen verhältnismäßig hohe Tauchzeiten auf. Bei Verwendung von Zementen mit niedrigem C<sub>2</sub>S-Gehalt waren die Tauchzeit kleiner.

Da die  $C_2S$ -Phase erst im fortgeschrittenen Hydratationsstadium an der Reaktion teilnimmt, kann ein beschleunigtes Ansteifen nicht direkt von einem hohen  $C_2S$ -Gehalt abhängen. Vielmehr können  $C_2S$ - und Alkali-Gehalt in einem Zusammenhang stehen, so daß die Anfangsreaktion in den ersten Minuten beeinflußt wird. Demnach wäre ein hoher  $C_2S$ -Gehalt nicht der Grund, sondern ein Indiz für eine beschleunigte Anfangsreaktion. Dieses Ergebnis unterstützt den von Fleischer [38] aufgezeigten Zusammenhang zwischen  $C_2S$ - und Alkali-Gehalt.

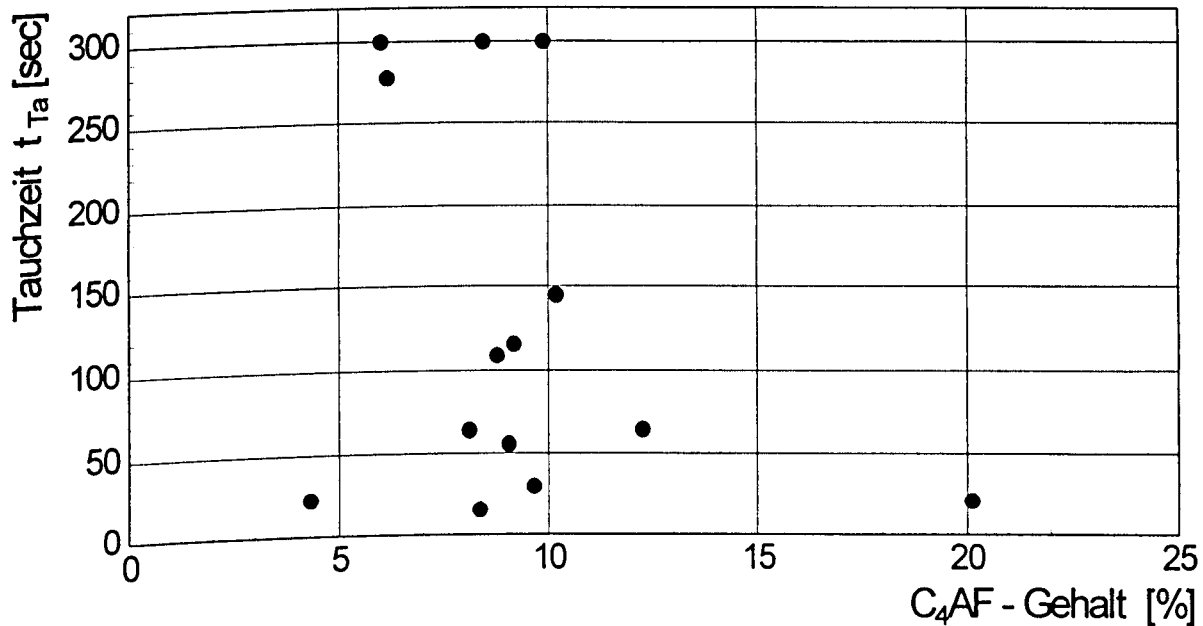


Bild 4.16: Zusammenhang zwischen  $C_4AF$ -Gehalt und Tauchzeit nach dem Mischen (Basis: naß-chemische Analyse)

Im Bild 4.15 ist der Zusammenhang zwischen  $C_3S$ -Gehalt und Tauchzeit dargestellt. Gemäß den Ergebnissen von Fleischer [38] nimmt der  $C_3S$ -Gehalt bei steigendem Alkaligehalt ab. Übertragen auf den Zusammenhang zwischen  $C_3S$ -Gehalt und Tauchzeit bedeutet dieses, daß die Tauchzeit mit abnehmendem  $C_3S$ -Gehalt zunimmt. Dieses wird durch die Ergebnisse nicht eindeutig bestätigt. Diese Feststellung trifft nur für hohe und niedrige  $C_3S$ -Gehalte zu, solange die Tauchzeit  $t_{Ta} < 150$  sec ist.

Bild 4.16 zeigt den Zusammenhang zwischen  $C_4AF$ -Gehalt und der Tauchzeit nach dem Mischen. Es ist keine eindeutige Korrelation zwischen beiden Größen erkennbar.

#### 4.3.4 Zusammenhang zwischen Wasseranspruch und Tauchzeit

Der Wasseranspruch der Zemente wurde gemäß DIN 1164, T. 5 aufgrund der Normsteife bestimmt. Auf das Meßverfahren wird an dieser Stelle nicht weiter eingegangen. Es wird auf

die Norm [18] verwiesen. Der Wasseranspruch ist für die untersuchten Zemente in Tab. A-5.3 angegeben. Im Bild 4.17 ist der Zusammenhang zwischen Wasseranspruch und Tauchzeit der Einpreßmörtel nach dem Mischen ( $W/Z = 0,38, 1,0 \% \text{ EH } 1$ ) aufgetragen. Bei einem Wasseranspruch  $< 27,5 \%$  lagen die Tauchzeiten unter  $t_{Ta} = 50 \text{ sec}$ . Bei einem Wasseranspruch  $> 28,0 \%$  wurden Tauchzeiten über  $t_{Ta} = 80 \text{ sec}$  gemessen.

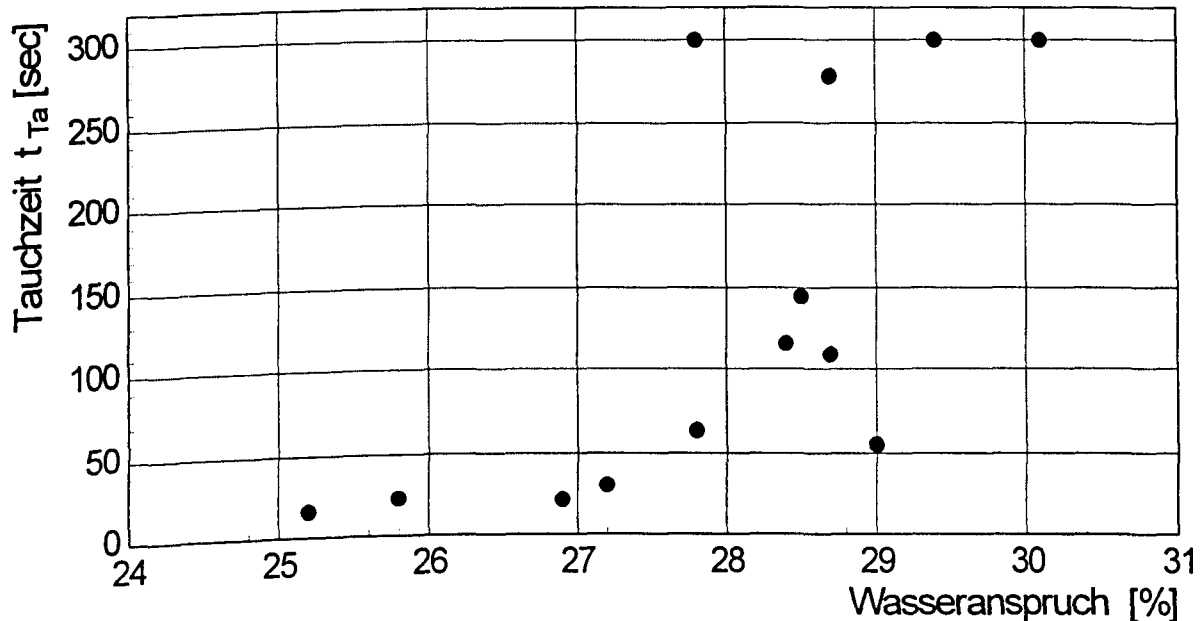


Bild 4.17: Zusammenhang zwischen Wasseranspruch und Tauchzeit nach dem Mischen

Der Wasseranspruch von Zementen ist für das Abschätzen der Fließfähigkeit von Einpreßmörteln ein sehr aussagekräftiges Kriterium. Das hängt damit zusammen, daß der Wasseranspruch von Zementen und die Fließfähigkeit von Einpreßmörteln im gleichen Zeitraum kurz nach dem Mischen bestimmt werden. Die Bestimmung des Wasseranspruchs des Zementes ist zur Beurteilung der Eignung der Zemente deswegen besonders zu empfehlen.

#### 4.3.5 Zusammenhang zwischen Hydratationswärmeentwicklung und Tauchzeit

Die Hydratationswärmeentwicklung wurde von dem erwähnten Forschungsinstitut der Zementindustrie mit einem adiabatischen Kalorimeter ermittelt. Das Kalorimeter war so aufgebaut, daß das Wasser dem trockenen Zement im Gerät zugegeben wurde. Dadurch konnte die Wärmeentwicklung vom Reaktionsbeginn gemessen werden. Die Wärmeentwicklung wurde über einen Zeitraum von  $t = 24 \text{ h}$  aufgezeichnet. Die Ergebnisse sind in Tab. A-4.3 zusammengestellt. Bild 4.18 zeigt den Zusammenhang zwischen Tauchzeit der Standardmörtel ( $W/Z = 0,38, 1,0 \% \text{ EH}$ ) und der Wärmeentwicklung der jeweiligen Zemente  $t = 30 \text{ min}$  nach Wasserzugabe. Die Tauchzeit nimmt mit der

freigesetzten Hydratationswärme zu. Anahnd der Hydratationswärme in den ersten  $t = 30$  min läßt sich die Fließfähigkeit nach dem Mischen grob abschätzen.

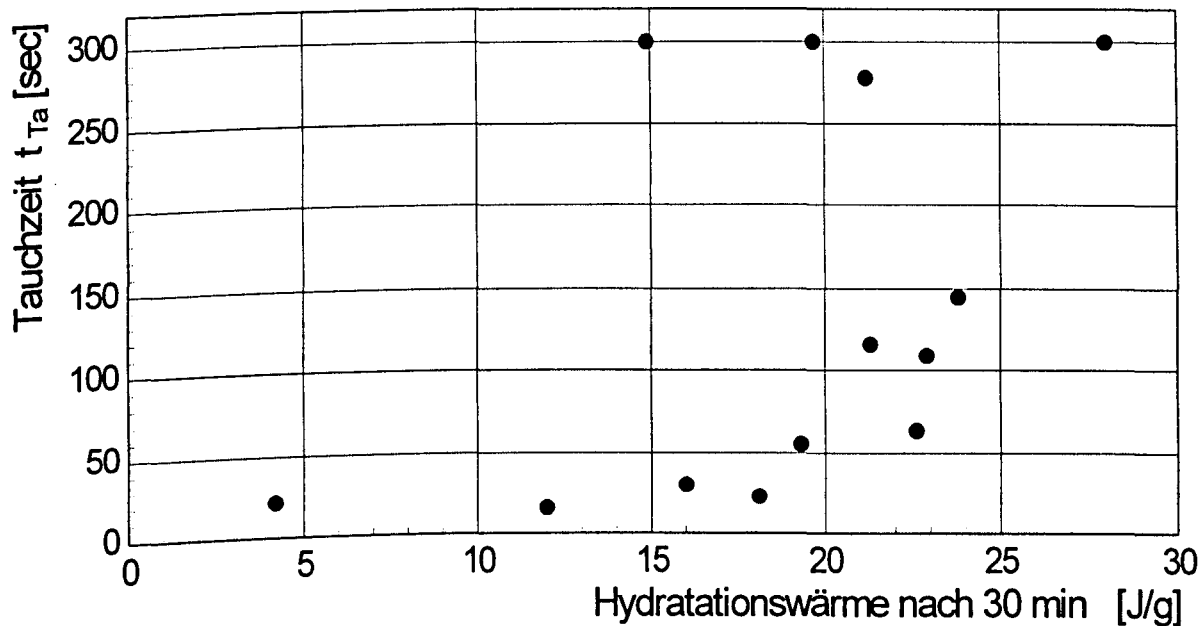


Bild 4.18 Zusammenhang zwischen Tauchzeit nach dem Mischen und Wärmeentwicklung der jeweiligen Zemente

#### 4.3.6 Lasergranulometrische Untersuchung von Zementen

Die Korngrößenverteilung der Zemente wurde lasergranulometrisch bestimmt. Die lasergranulometrische Korngrößenuntersuchung bedient sich der Lichtbeugung. Bezüglich der theoretischen Grundlagen wird auf die Literatur verwiesen [44], [84], [85]. Die Zemente wurden mit zwei Lasergranulometern mit unterschiedlicher Dispergiermethode untersucht. Bei dem einen Gerät wurden die Zemente mit Isopropanol naß dispergiert. Bei dem anderen Gerät wurden die Zemente trocken dispergiert. Die Ergebnisse der Korngrößenverteilungen und die zugehörigen Summenkurven sind in den Bildern A-4.8.1 - 14 dargestellt.

Beim Vergleich der unterschiedlichen Dispergierv Verfahren (naß und trocken) fällt auf, daß der Feinanteil (bis ca.  $15 \mu\text{m}$ ) bei Naß-Dispergierung kleiner ist als bei Trockendispergierung. Die Ergebnisse legten die Vermutung nahe, daß sich die Zementkörner beim Dispergieren mit Isopropanol agglomeriert hatten. Die Versuche wurden deswegen wiederholt. Dabei wurde ein baugleiches Lasergranulometer verwendet, daß auch bei der Trockendispergierung verwendet wurde. Diese Gerät gestattete nach Austausch der Dispergiereinheit gleichzeitig eine Naß-Dispergierung. Auf diese Weise konnten mit dem gleichen Grundgerät (Laser-, Registrier- und Auswerteeinheit) beide Dispergierv Verfahren eingesetzt werden.

Die Versuche bestätigten die Ergebnisse, daß der Feinanteil beim Trockendispergieren größer ist als beim Naßdispergieren. Korngrößenverteilung und Summenlinie weisen demzufolge bei trockener Analyse eine größere Mahlfeinheit aus als beim Naßdispergieren.

Aufgrund des besseren Aufschlusses ist ein trocken dispergierendes Lasergranulometer zu bevorzugen. Die Gründe für die unterschiedlichen Ergebnisse bei trockener und naßer Dispergiermethode konnte auch nach Rücksprache mit einem der Gerätehersteller jedoch nicht eindeutig geklärt werden.

#### 4.3.7 Lasergranulometrische Untersuchung von Zementleim

Um einer möglichen Auswirkung des Isopropanols gezielt nachzugehen, wurde ein Versuch mit einem Zement und einem daraus hergestellten Zementleim durchgeführt. Als Zement wurde Z 9 verwendet. Der Zementleim wurde mit  $W/Z = 0,40$  hergestellt.

Zunächst wurde der Zement in Isopropanol naß dispergiert mit dem Lasergranulometer untersucht. Anschließend wurde Zementleim hergestellt. Dieser wurde einmal sofort nach dem Mischen und ein zweites Mal 30 Minuten nach dem Mischen naß dispergiert in Isopropanol untersucht. In allen Fällen wurde das Prüfgut 2 Minuten vor der Messung 60 sec mit Ultraschall beaufschlagt. Bild 4.19 zeigt die Ergebnisse.

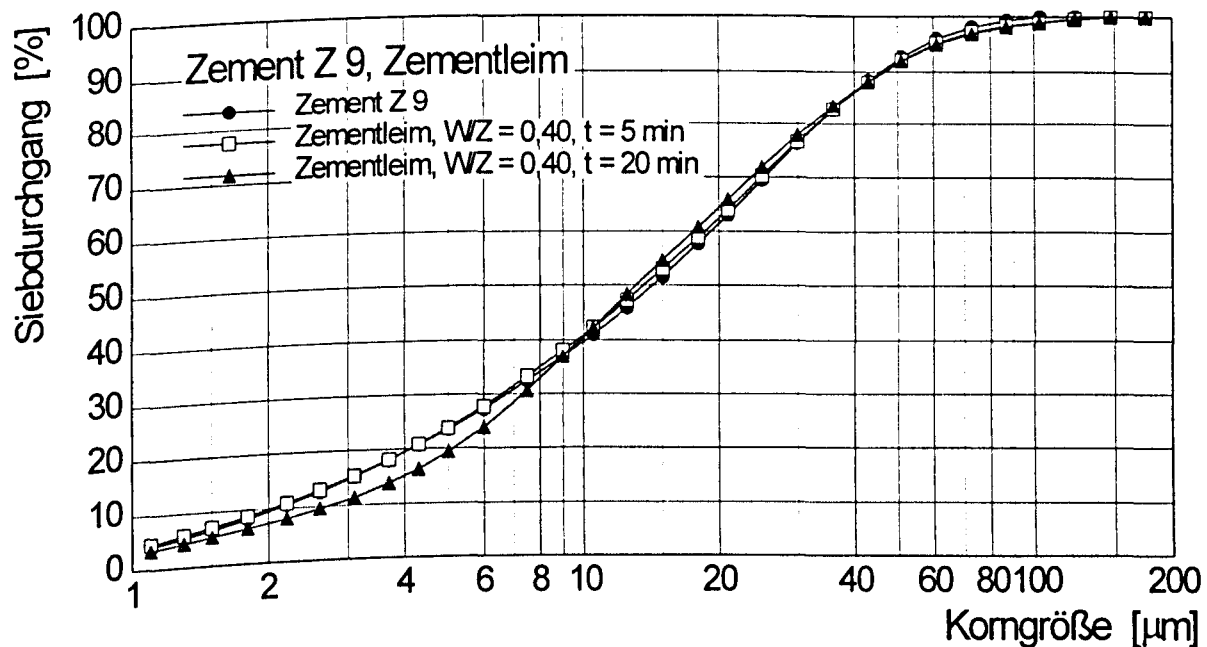


Bild 4.19: Korngrößenverteilung von Zement Z 9 und Zementleim mit Z 9,  $W/Z = 0,40$ ; beide naß dispergiert

Überraschenderweise ist kein signifikanter Unterschied in Korngrößenverteilung und Summenkurve erkennbar. Der Zementleim hatte bis zu einer Korngröße von  $d_k = 10 \mu\text{m}$  sogar einen größeren Anteil als das trockene Zementmehl. Eine Agglomeratbildung verbunden mit einsetzender Hydratation kann somit als Erklärung für den geringeren Feinanteil bei Naßdispergierung ausgeschlossen werden.

#### 4.3.8 Vergleich der spezifischen Oberflächen

Aus der lasergranulometrischen Korngrößenuntersuchung kann mit äquivalenten Korndurchmessern die spezifische Oberfläche bestimmt werden. Die spezifische Oberfläche ermittelt aus der Kornverteilung wird nachfolgend mit  $S_m$  abgekürzt.

Gemäß DIN 1164, T. 4 wird die spezifische Oberfläche nach Blaine bestimmt. Diese wird nachfolgend mit  $O_{\text{spez.}}$  abgekürzt. Beim Blaine-Verfahren wird die spezifische Oberfläche indirekt aus der Luftdurchlässigkeit des Zementbetts, deren Porosität, der Dichte des Zementes und der temperaturabhängigen Viskosität der Luft bestimmt. Da es sich um ein Gegenstromverfahren handelt, ist die Dichte des Prüfmediums entscheidend.

Für die Bestimmung der Korngrößenverteilung beim Lasergranulometer ist die Korndichte bedeutungslos. Bei dem Verfahren werden die Korngrößen direkt bestimmt. Die Korndichte erlangt erst für die Bestimmung der gewichtsspezifischen Kornoberfläche an Bedeutung. In Tab. 4.2 sind die spezifischen Oberflächen ermittelt mit Blaine-Gerät und Lasergranulometer (naß und trocken dispergiert) gegenübergestellt.

Während die spezifischen Oberflächen nach Blaine  $O_{\text{spez.}}$  überwiegend gut mit den spezifischen Oberflächen bei Naßdispergierung  $S_m(\text{naß})$  übereinstimmen, sind die spezifischen Oberflächen bei Trockendispergierung  $S_m(\text{trocken})$  deutlich größer. Das Verhältnis von  $O_{\text{spez.}}/S_m(\text{trocken})$  beträgt i.M. 0,70.

Es ist festzustellen, daß die spezifischen Oberflächen (Blaine, naß und trocken dispergiert) nicht vergleichbar sind. Wie bei Korngrößenverteilung und Summenkurve bestimmt das Analyseverfahren sehr stark das Ergebnis. Auch Kontrollmessungen (Naß- und Trockendispergierung beim Lasergranulometer) führten im Rahmen der Streuung zu den gleichen Ergebnissen. Die Gründe für die Unterschiede konnten somit nicht eingegrenzt werden.



Tab. 4.2: Vergleich der spezifische Oberflächen (aus äquivalenten Korndurchmessern bestimmt mit dem Lasergranulometer und mit dem Blaine-Versuch)

Zement	Blaine	Lasergranulometer		$O_{\text{spez.}} / S_m(\text{trocken})$ [%]
	Spezifische Oberfläche $O_{\text{spez.}}$ [cm <sup>2</sup> /g]	naß dispergiert $S_m(\text{naß})$ [cm <sup>2</sup> /g]	trocken dispergiert $S_m(\text{trocken})$ [cm <sup>2</sup> /g]	
Z 1	3290	3214	5647	58,26
Z 2	3470	3014	5170	67,11
Z 3	3740	3670	5476	68,29
Z 4	4390	3366	6376	68,85
Z 5	3770	2466	5493	68,63
Z 6	3460	3158	5098	67,87
Z 7	3810	3191	5651	67,41
Z 8	4560	3723	6149	74,16
Z 9	3940	3231	5357	73,55
Z 10	3760	3595	4711	79,81
Z 11	4200	5521	5909	71,07
Z 12	3680	4515	4658	79,00
Z 13	2960	3734	5227	56,62
Z 14	n.b.	2946	n.b.	-

#### 4.3.9 Vergleich der Kornverteilungen unterschiedlicher Zemente

Die Unterschiede der Kornverteilungen für die untersuchten Zemente werden aus den Bildern A-4.8.1 - 14 nicht klar ersichtlich. Die Kornverteilungen der Zemente sind deswegen in Gruppen in den Bildern A-4.9.1 - 4 (Naß-Dispergierung) und A-4.10.1 - 4 (Trockendispergierung) zusammengestellt. Die Unterschiede in der Kornverteilung werden im  $x_{50}$ -Wert und in der Korngröße  $d_k < 15 \mu\text{m}$  besonders deutlich. Auf den Zusammenhang zwischen Kornzusammensetzung der Zemente und Fließfähigkeit der Mörtel wird nachfolgend eingegangen.

#### 4.3.10 Einfluß der Kornverteilung auf die Fließfähigkeit

Bild 4.20 zeigt den Zusammenhang zwischen der spezifischen Oberfläche nach Blaine und der Tauchzeit nach dem Mischen für die Standardrezeptur ( $W/Z = 0,38$ , 1,0 % EH,

Kolloidalmischer). Es ist deutlich zu erkennen, daß die Tauchzeit mit der spezifischen Oberfläche nach Blaine zunahm.

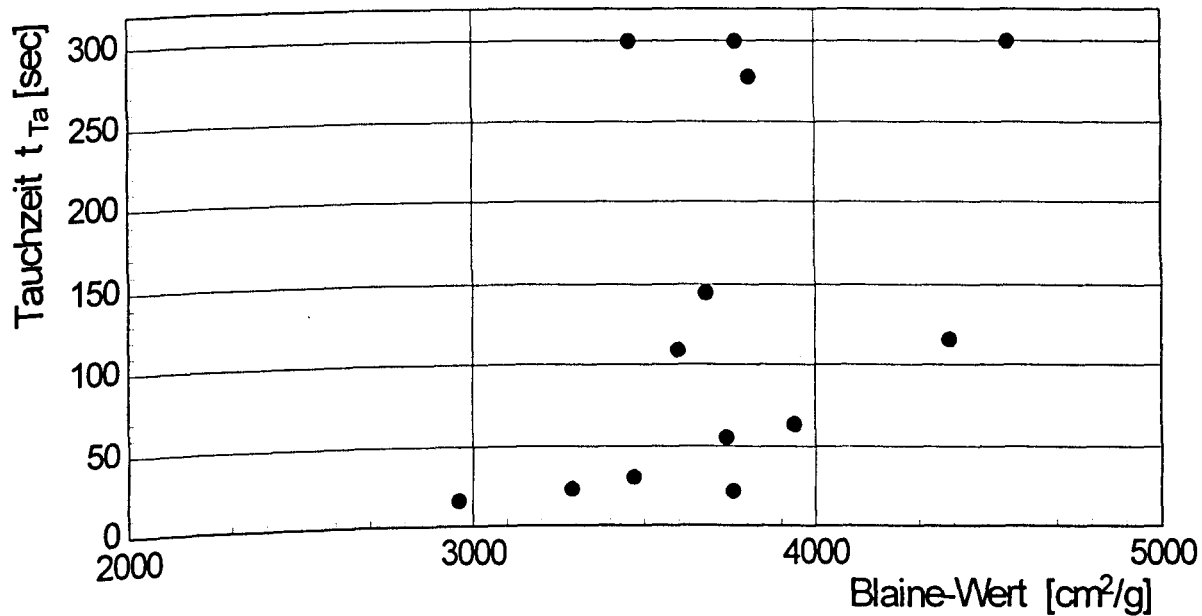


Bild 4.20: Tauchzeit nach dem Mischen in Abhängigkeit der spezifischen Oberfläche nach Blaine

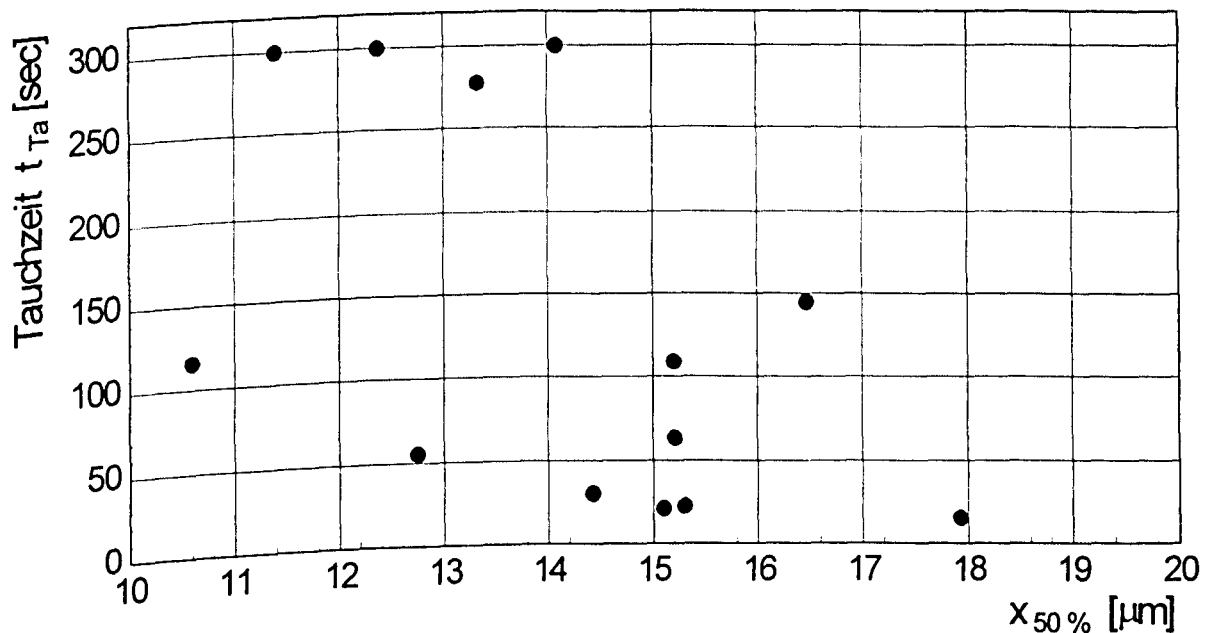


Bild 4.21: Tauchzeit nach dem Mischen in Abhängigkeit der Korngröße bei 50 % Siebdurchgang

Anstatt des Blaine-Wertes wird die Mahlfineinheit auch in der Korngröße  $x_{50\%}$  bei 50 % Siebdurchgang deutlich. Der Wert  $x_{50\%}$  kann Summenkurve der lasergranulometrischen Korngrößenverteilung entnommen werden. Im Bild 4.21 ist der Zusammenhang zwischen

der Korngröße bei 50 % Siebdurchgang und der Tauchzeit aufgetragen. Die Tauchzeit nach dem Mischen nahm abnehmender Korngröße bei 50 % Siebdurchgang zu. Diese wurde durch die Ergebnisse mit Zement Z 13 (PZ 35 F) unterstützt ( $x_{50\%} = 17,9 \mu\text{m}$ ,  $t_{\text{Ta}} = 15,8 \text{ sec}$  bei  $W/Z = 0,38$ ).

Bei einem hohen Feinkornanteil ist die reaktive Oberfläche bei Hydratationsbeginn groß. Die Anfangsreaktion kann dadurch schnell voranschreiten. Der Steifigkeitsbeginn wird beschleunigt. Die Fließfähigkeit des Mörtels nimmt ab.

#### **4.4 Mörtelmodifikation durch Zugabe von FM, MS oder Kunststoffdispersion**

##### **4.4.1 Überblick**

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Mörtelprüfungen vorgestellt, bei denen die Mörtel gezielt mit Zusatzmitteln oder -stoffen modifiziert wurden.

##### **4.4.2 Ergebnisse der Mörtelversuche mit FM-Zusatz**

In Abhängigkeit des verwendeten Zementes wurde bei einigen Mörteln unter Anwendung der Standardrezeptur ( $W/Z = 0,38$ , 1,0 % EH, Mischer O) eine schlechte Fließfähigkeit festgestellt. Die Tauchzeit nach dem Mischen war dann  $t_{\text{Ta}} > 60 \text{ sec}$ . Durch Versuche sollte geprüft werden, wie die Fließfähigkeit durch Nachdosieren von FM verändert werden kann. Für die Modifikation wurde das gleiche Fließmittel verwendet, daß auch in der Einßpreßhilfe EH 1 enthalten war. Bei den zusätzlich zugegebenen Fließmittel handelte es sich um ein Naphthalinsulfat. Dieses war bauaufsichtlich zugelassen.

Tab. 4.3 zeigt die Tauch- und Auslaufzeiten in Abhängigkeit der verwendeten Zemente für die Standardrezeptur im Vergleich zu den modifizierten Mörteln.

Tab. 4.3: Einfluß von FM und EH-Gehalt auf die Fließfähigkeit von Einpreßmörteln

Zement	EH	FM	Auslaufzeit $t_{Tr}$ [sec]			Tauchzeit $t_{Ta}$ [sec]			$f_c$ [N/mm <sup>2</sup> ]
Meßzeitpunkt			0 min	30 min	60 min	0 min	30 min	60 min	
Z 4	1,0 %	-	21,0	-	-	280,0	472,0	-	40,9
"	1,0 %	0,5 %	12,6	-	30,4	69,3	-	236,6	36,7
Z 5	1,0 %	-	Tropfen	-	-	> 6 min	-	-	-
"	1,5 %	-	16,0	26,0	34,0	90,0	179,0	246,0	-
Z 6	1,0 %	-	Tropfen	-	-	> 6 min	-	-	-
"	2,0 %	0,6 %	9,0	11,0	11,5	22,0	86,5	107,0	-
Z 7	1,0 %	-	26,0	-	-	278,0	-	-	-
"	1,0 %	0,5 %	16,0	-	-	76,9	-	-	-
Z 9	1,0 %	-	21,3	17,1		63,7	94,3		44,4
"	1,0 %	0,5 %	13,4		18,5	28,1		80,5	46,7
Z 12	1,0 %	-	16,5	35,8		80,3	244,3		41,8
"	1,0 %	0,5 %	12,0	14,9	16,5	23,0	64,9	110,0	41,0
Z 14	1,0 %	-	22,9	-	-	64,0	104,0	132,5-	48,4
"	1,0 %	0,5 %	16,3	20,9	27,0	30,1	54,8	81,0	-

Z 14 mit Handmischer hergestellt, sonst Kolloidalmischer

Bei den Mörteln mit den Zementen Z 4, Z 7, Z 9, Z 12 und Z 14 wurde jeweils 0,5 % FM bezogen auf den Zementgehalt zugegeben. Das Fließmittel entsprach jenem, das auch in der verwendeten Einpreßhilfe enthalten war. Es wurde in flüssiger Form zugegeben und auf den Wassergehalt angerechnet.

Durch die Zugabe von 0,5 % FM konnte bei den Mörteln mit Z 4 und Z 7 die Tauchzeit nach dem Mischen von  $t_{Ta} \approx 280$  sec auf  $t_{Ta} \approx 65$  sec gesenkt werden. Die Auslaufzeit reduzierte sich von  $t_{Tr} \approx 24$  sec auf  $t_{Tr} \approx 14$  sec.

Die Fließfähigkeit der Mörtel mit den Zementen Z 9, Z 12 und Z 14 war bei der Standardrezeptur besser als mit den Zementen Z 4 und Z 7. Die Tauchzeiten nach dem Mischen lagen in der Grenze von  $63 \text{ sec} \leq t_{Ta} \leq 98 \text{ sec}$ . Durch die Zugabe von 0,5 % FM konnte die Tauchzeit auf  $t_{Ta} \approx 30$  sec verringert werden. Die Auslaufzeiten wurden entsprechend kleiner (von  $t_{Tr} \approx 20$  sec - ohne FM-Zugabe,  $t_{Tr} \approx 14$  sec - mit FM-Zugabe).

Bei dem Mörtel mit Zement Z 5 wurde die Zugabemenge an Einpreßhilfe von 1,0 % auf 1,5 % erhöht. Auf diese Weise konnte von einem zunächst nicht fließfähigem Mörtel ein halbwegs fließfähiger Mörtel hergestellt werden.

Bei dem Mörtel mit Z 6 wurde der Gehalt an Einpreßhilfe von 1,0 % auf 2,0 % erhöht, und gleichzeitig wurden 0,6 % Fließmittel zugegeben. Der nach Standardrezeptur hergestellte Einpreßmörtel war nicht fließfähig. Durch die Modifikation konnte ein gut fließfähiger Mörtel mit einer Tauchzeit von  $t_{Ta} = 22$  sec nach dem Mischen hergestellt werden. 30 Minuten nach dem Mischen betrug die Tauchzeit  $t_{Ta} = 86,5$  sec und hatte den zulässigen Wert nach Norm nur geringfügig überschritten. Nach 60 Minuten lag die Tauchzeit mit  $t_{Ta} = 107$  sec zwar über dem zulässigen Wert nach Norm, aber unterhalb der zulässigen Tauchzeit für Mörtel mit dem Swibo-Mischer gemischt (bauaufsichtliche Zulassung für Swibo-Mörtel  $t_{Ta} = 180$  sec).

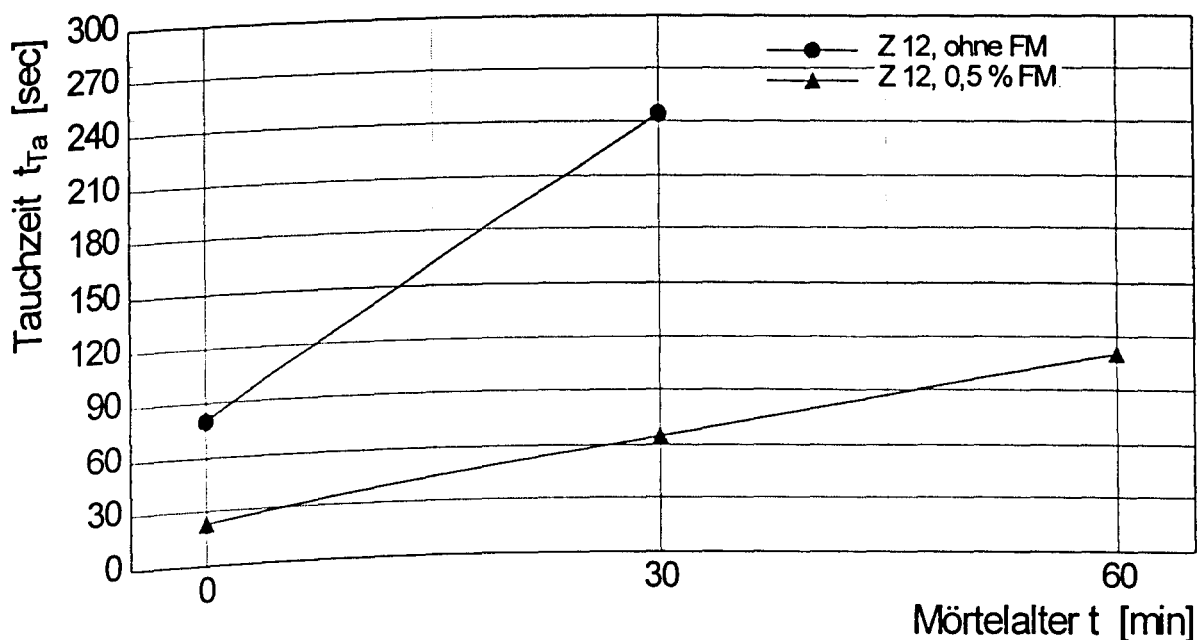


Bild 4.22: Einfluß von Fließmittel auf die Tauchzeit

Bild 4.22 zeigt die Veränderung der Tauchzeit bei Zugabe von Fließmittel exemplarisch. Die entsprechenden Bilder für die übrigen Rezepturen enthält Anlage A-4.11. Neben der absoluten Verringerung der Tauchzeit nahm die Tauchzeit innerhalb der ersten Stunde weniger zu als ohne Fließmittel. Durch das Fließmittel wird eine Agglomeratbildung im frischen Mörtel offenbar verzögert. Diese Erscheinung trat auch in den Versuchen von [94] auf.

4.4.3 Ergebnisse der Mörtelversuche mit Kunststoffdispersion

Tab. 4.4 zeigt die Mörtelrezepturen, bei denen Kunststoffdispersion (Ku) zugegeben wurde. Alle Mörtel wurden mit Zement Z 1 und EH 1 hergestellt.

Tab. 4.4: Mörtelzusammensetzung zur Untersuchung des Einflusses der Kunststoffdispersion

	ohne Kunststoffdispersion	mit Kunststoffdispersion		
	Mörtel M 1	Mörtel M 2	Mörtel M 3	Mörtel M 4
Mischertyp	Kolloidalmischer	Kolloidalmischer	Kolloidalmischer	Handmischer
Zement Z 1	100,0 kg	100,0 kg	100,0 kg	10,0 kg
Wasser	38,0 kg	33,0 kg	28,0 kg	3,0 kg
Einpreßhilfe	1,0 %	1,0 %	1,0 %	1,0 %
Kunststoffdispersion	-	10,0 kg	10,0 kg	1,0 kg
W/Z	0,38	0,38	0,33	0,35
Druckfestigkeit $f_{c,28}$	41,3 N/mm <sup>2</sup>	54,2 N/mm <sup>2</sup>	41,3 N/mm <sup>2</sup>	58,5 N/mm <sup>2</sup>

Bild 4.23 zeigt den Tauchzeiten von Einpreßmörtel ohne und mit Zugabe der Kunststoffdispersion. Der W/Z-Wert war bei beiden Mörteln identisch. Sofort nach dem Mischen waren die Tauchzeiten mit  $t_{Ta} = 22,8$  sec (ohne Kunststoffdispersion) und 18,9 sec (mit Kunststoffdispersion) ähnlich. Der Einfluß der Kunststoffdispersion wurde besonders 30 und 60 Minuten nach dem Mischen deutlich. Während die Tauchzeit bei dem Mörtel ohne Kunststoffdispersion deutlich anstieg, nahm die Tauchzeit bei Zugabe der Kunststoffdispersion nur geringfügig zu.

Tab. 4.5: Vergleich der Tauchzeiten Mörtel M 1 und M 2

Prüfzeitpunkt	Tauchzeit $t_{Ta}$ [sec] Mörtel M 1	Tauchzeit $t_{Ta}$ [sec] Mörtel M 2
0 Minuten	22,8	18,9
30 Minuten	58,0	23,3
60 Minuten	79,3	27,0

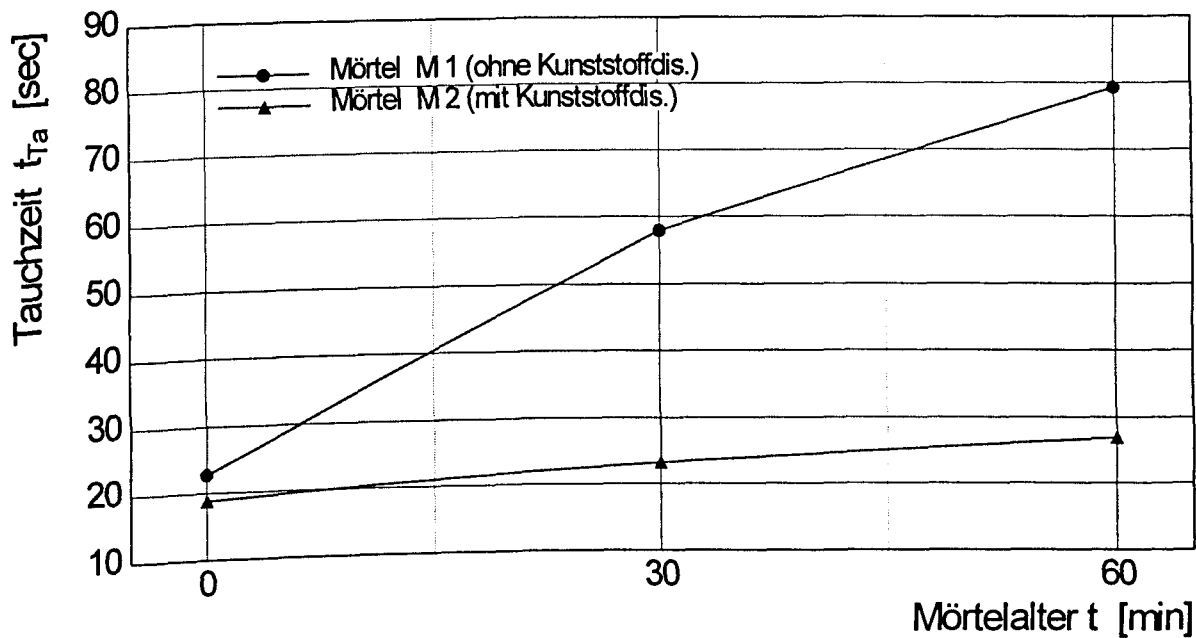


Bild 4.23: Vergleich der Tauchzeiten von Einpreßmörtel ohne (M 1) und mit Kunststoffdispersion (M 2)

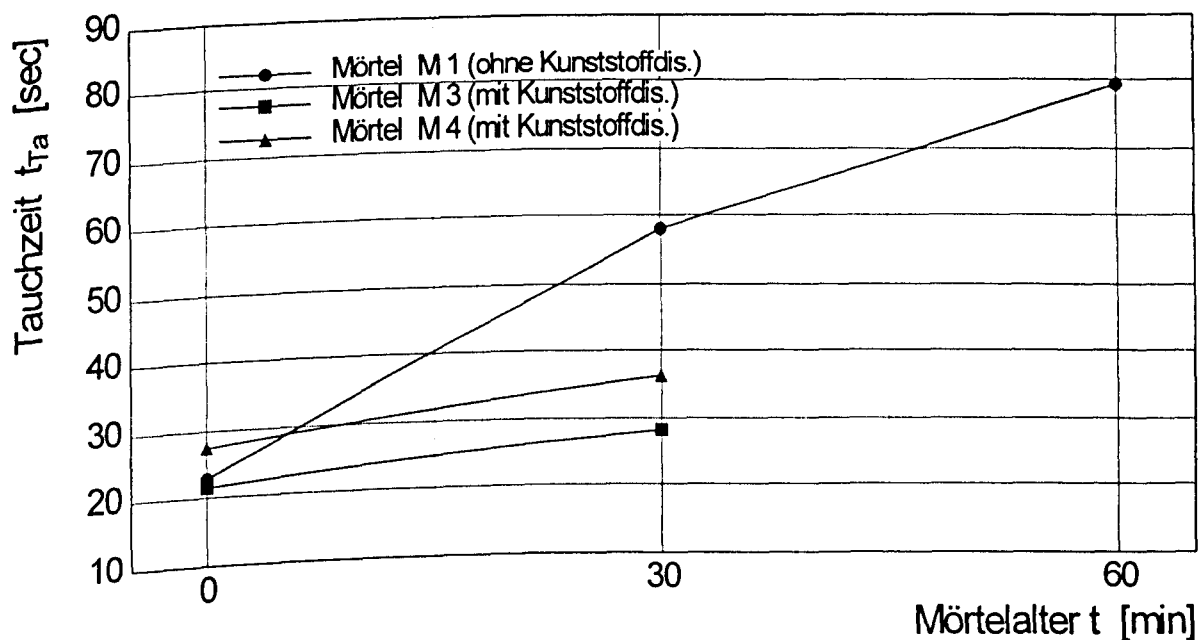


Bild 4.24: Vergleich der Tauchzeiten von Einpreßmörtel ohne (M 1) und mit Kunststoffdispersion (M 3 und M 4)

Das geringere Ansteigen der Tauchzeit bei Zugabe der Kunststoffdispersion wird auch im Bild 4.24 deutlich. Dort sind die Tauchzeiten von Mörtel M 1 im Vergleich zu denen von Mörtel M 3 und M 4 dargestellt. Bei dem Vergleich muß berücksichtigt werden, daß die Mörtel M 3 und M 4 hergestellt wurden. Die Mörtel mit unterschiedlichem W/Z-Wert und verschiedenen Mischern hergestellt wurden. Die Tauchzeiten unterscheiden sich deswegen nach dem Mischen geringfügig. Bei Zugabe der

Kunststoffdispersion nahm die Tauchzeit bei den Mörteln M 3 und M 4 deutlich langsamer zu als bei Mörtel M 1, der ohne Kunststoffzusatz hergestellt wurde.

Tab. 4.6: Ergebnisse der Eignungsprüfung von Mörtel M 3

Datum	Mörtel-temp. T (°C)	Tauchzeit $t_{Ta}$ (sec)		Trichterzeit $t_{MT}$ (sec)		Volumen- änderung $\Delta V$ (%)	$f_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	Prüfalter t (d)	Mischer
		0 min	30 min	0 min	30 min				
08.06.94	22,0	18,0	30,0	80,0	100,0	+ 1,13	-		Kolloidal
09.06.94	18,0	20,0	20,0	65,0	79,0	+ 1,20	-		Kolloidal
14.06.94	22,0	18,0	20,5	61,0	83,0	+ 1,03	-		Kolloidal
26.07.94	26,0	28,5	47,0	83,0	183,0	+ 1,06	61,6	> 28	Kolloidal
20.09.94	18,5	21,5	23,0	66,0	77,0	+ 1,03	52,3	36	Kolloidal
26.09.94	20,3	23,0	32,5	78,0	94,0	+ 1,73	61,7	30	Kolloidal
Mittelwerte		21,5	28,3	72,2	102,7	+ 1,20	58,5		

Tab. 4.7: Ergebnisse der Eignungsprüfung von Mörtel M 4

Datum	Mörtel-temp. T (°C)	Tauchzeit $t_{Ta}$ (sec)		Trichterzeit $t_{MT}$ (sec)		Volumen- änderung $\Delta V$ (%)	$f_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	Prüfalter t (d)
		0 min	30 min	0 min	30 min			
09.11.93	10,0	29,0	37,5	133,0	-	+ 0,56	27,0	10
11.11.93	12,0	31,0	41,5	112,0	-	+ 0,70	32,9	> 90
03.05.94	-	32,0	37,5	79,0	-	+ 1,30	45,0	17
05.05.94	-	26,0	39,5	76,0	-	+ 0,50	44,0	15
10.05.94	-	28,5	37,0	83,0	97,0	+ 0,45	54,0	> 28
16.05.94	18,0	31,0	42,0	84,0	110,0	+ 1,07	-	
18.05.94	18,0	30,0	36,5	82,0	-	+ 0,50	75,3	> 28
24.05.94	-	26,0	35,5	95,0	-	+ 1,20	-	
14.07.94	24,0	26,5	34,0	109,0	151,0	+ 0,40	65,3	> 28
19.07.94	21,0	19,0	33,5	84,0	146,0	+ 0,80	61,4	> 28
15.09.94	17,5	23,0	23,5	79,0	78,0	+ 1,90	45,6	41
Mittelwerte		27,5	36,2	92,4	116,4	+ 0,85	50,1	

-: nicht bestimmt

Die in Tab. 4.6 und 4.7 erwähnten Volumenänderungen wurden mit der Dose gemäß DIN 4227, T. 5 gemessen. Die mit der Dose gemessenen Volumenänderungen sind i.M. kleiner als die mit dem 1.000 ml Standzylinder. Die Unterschiede sind durch die



Prüfmethode bedingt. Unter Baustellenbedingungen war die Messung der Volumenänderung mit dem Standzylinder schneller und deutlich leichter auszuführen als mit der Dose. Auf die Erfahrungen mit den Prüfverfahren wird noch eingegangen.

In Tab. 4.8 sind Volumenänderung und Wasserabsondern für die Mörteln M 1, M 3 und M 4 zusammengestellt. Die dort aufgeführten Werte wurden mit dem 1.000 ml Meßzylinder gemessen. Die Volumenänderung war bei Mörtel M 1 am kleinsten, bei Mörtel M 4 (mit Kunststoffdispersion, Handmischer) größten. Das Wasserabsondern war bei Mörtel M 1 am größten, bei Mörtel M 4 am kleinsten. Insgesamt lagen die gemessenen Werte innerhalb der zulässigen Grenzen nach prEN 445 [29].

Tab. 4.8: Volumenänderung und Wasserabsondern 4 h nach dem Mischen mit 1.000 ml Meßzylinder bestimmt

	Mörteltemp. T (°C)	Volumenänderung $\Delta V$ (%)	Wasserabsondern $\Delta V_w$ (%)
Mörtel M 1	21,8	+ 2,06	0,63
Mörtel M 3	21,0	+ 3,20	0,47
Mörtel M 4	18,5	+ 5,26	0,105

Bei den Versuchen nahm die Festigkeit entgegen der Feststellungen in [51], [52] nicht ab, s. Tab. 4.6 und 4.7. Die Festigkeit war bei dem Mörtel mit Kunststoffdispersion sogar größer als ohne Kunststoffdispersion. Die nach Norm [21], [45], [47] geforderte Zylinderdruckfestigkeit von  $f_c = 30 \text{ N/mm}^2$  wurde in allen Fällen weit überschritten.

Auch wenn die Kunststoffdispersion bei konstantem W/Z-Wert einen Festigkeitsabfall des Mörtels verursacht, kann durch die verflüssigende Wirkung der W/Z-Wert herabgesetzt werden. Dieses begünstigt die Festigkeitentwicklung.

#### 4.4.4 Ergebnisse der Mörtelversuche mit MS-Zusatz

Über die günstige Wirkung von Mikrosilika auf die Eigenschaften von Einpreßmörteln wurde vielfach berichtet, s. Kap. 2. Durch die hier ausgeführten Versuche sollte die Wirkung von MS im Vergleich zu anderen Mörtelmodifikationen untersucht werden. Im Vordergrund der Mörteluntersuchungen standen Fließfähigkeit, Volumenänderung und Wasserabsondern. Die Ergebnisse der Mörtelversuche sind in in Tab. A-4.4 angegeben.

#### 4.4.4.1 Fließfähigkeit

Die Bilder 4.25 und 4.26 zeigen exemplarisch die Tauchzeiten in Abhängigkeit vom Mörtelalter. Durch die große spezifische Oberfläche von Mikrosilika wird der Wasseranspruch der Mischung größer. In den Versuchsergebnissen kommt dies durch eine größere Tauchzeit zum Ausdruck. Bei den in der Standardrezeptur steiferen Mörteln mit Zement Z 9, Z 10 und Z 11 stieg die Tauchzeit bei Zugabe von 5,0 M.-% MS besonders stark an. Bei Zugabe von 1,0 M.-% MS änderte sich die Tauchzeit gegenüber einer Mischung ohne MS-Zugabe kaum.

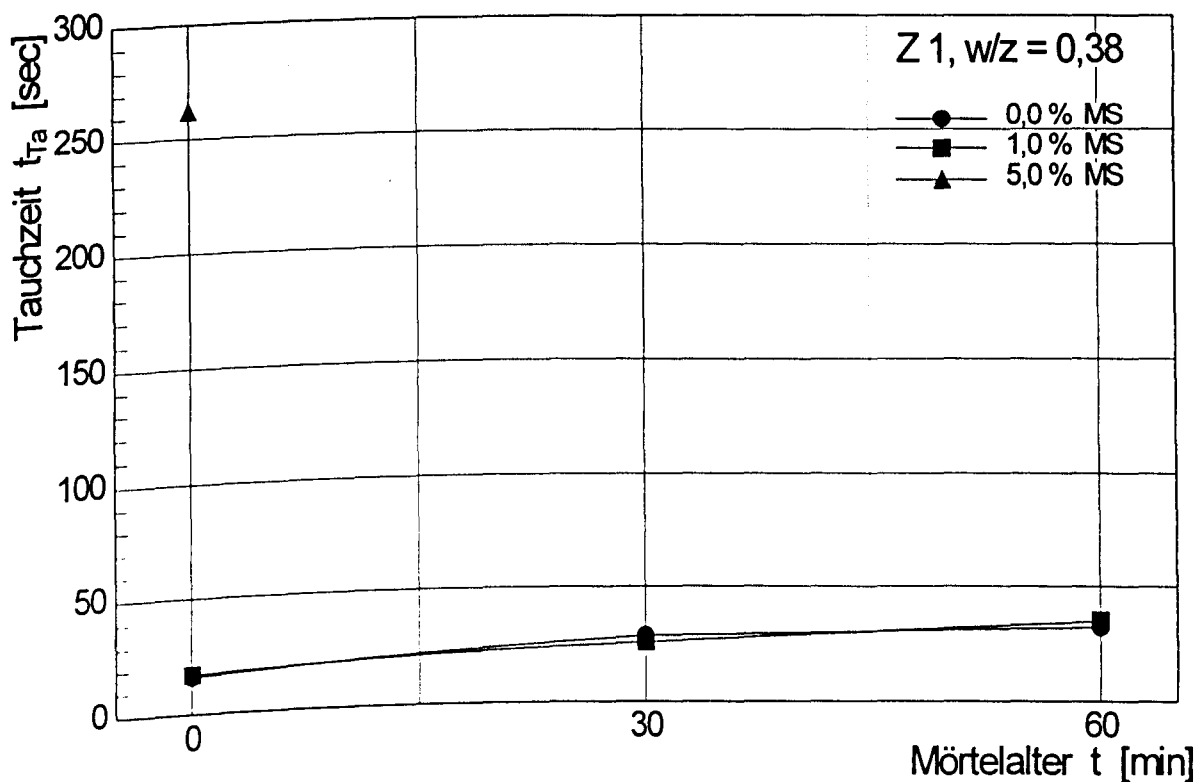


Bild 4.25: Tauchzeit für Mörtel mit Zement Z 1 und MS-Zugabe

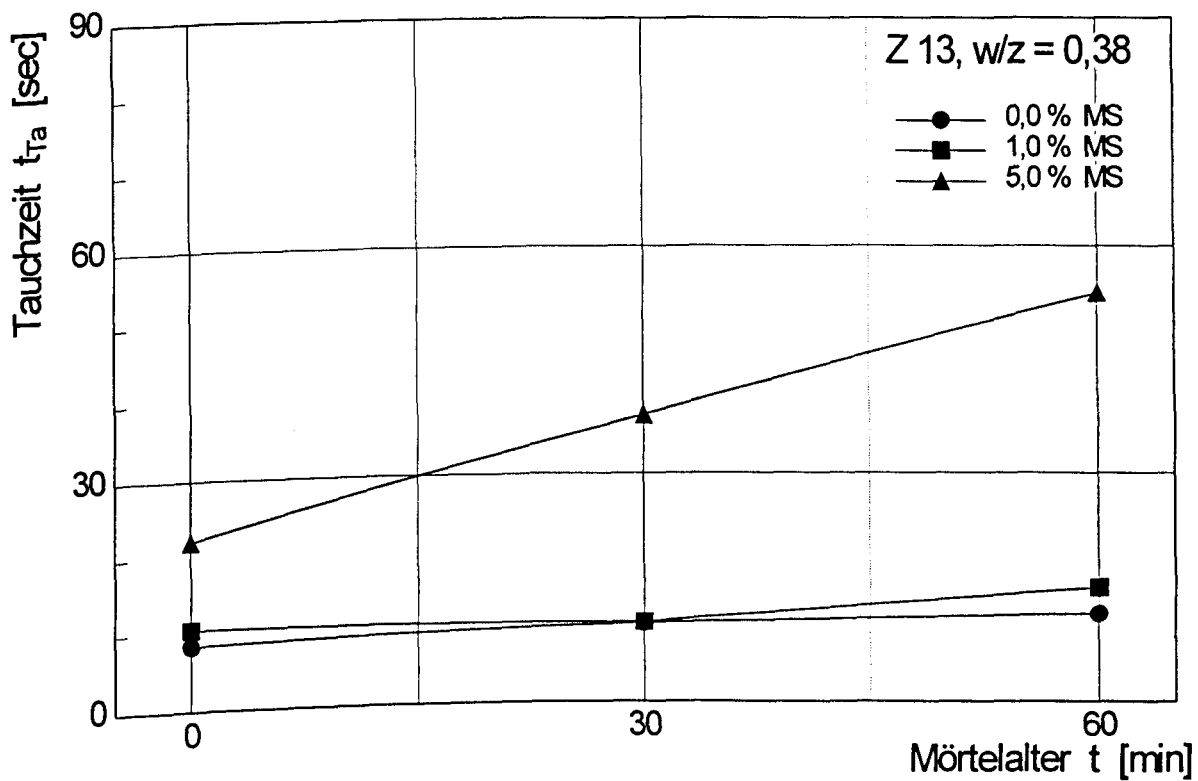


Bild 4.26: Tauchzeit für Mörtel mit Zement Z 13 und MS-Zugabe

#### 4.4.4.2 Wasserabsondern

Bild 4.27 zeigt exemplarisch die abgesonderte Wassermenge für zwei verschiedene Mörtel in Abhängigkeit der MS-Zugabe. Schon bei Zugabe von 1,0 M.-% MS nahm die abgeson-

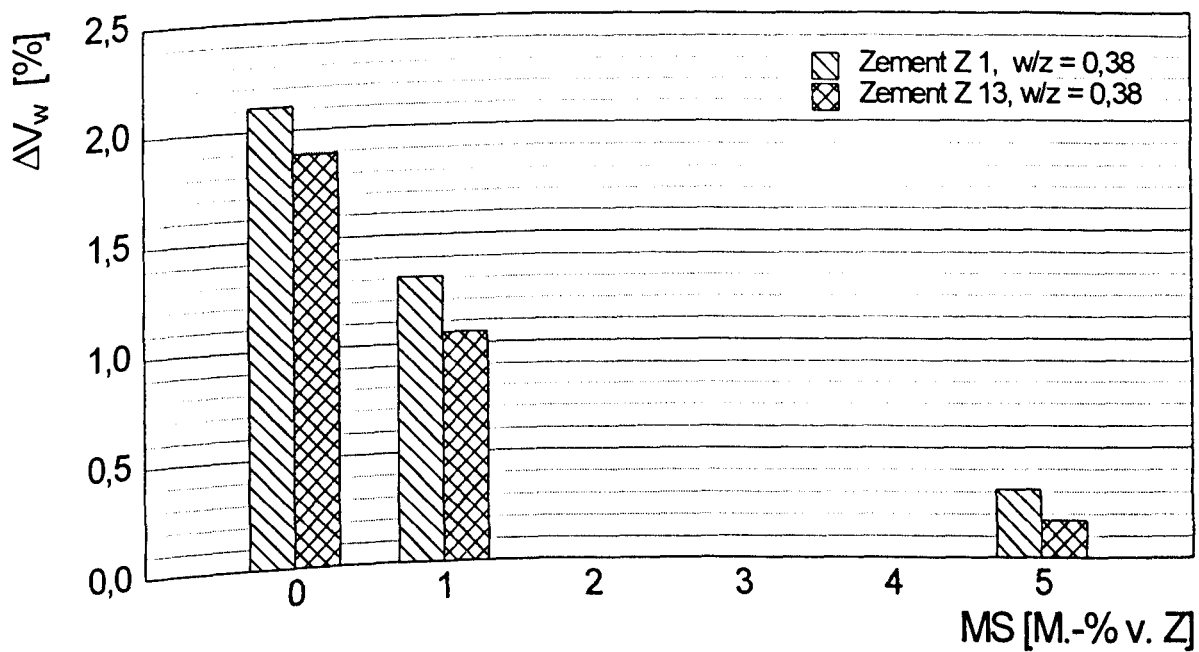


Bild 4.27: Abgesonderte Wassermenge in Abhängigkeit der MS-Zugabe

derte Wassermenge von  $\Delta V_W \approx 2,0 \%$  auf etwa  $\Delta V_W \approx 1,15 \%$  ab. Bei Zugabe von 5,0 % MS betrug die abgesonderte Wassermenge unter  $\Delta V_W < 0,4 \%$ . Die Zugabe von MS auch in geringen Mengen wirkt sich also günstig auf das Wasserabsondern aus.

4.5      **Einfluß hoher und tiefer Temperaturen**

4.5.1    **Allgemeines**

Die Mörtelversuche wurden bei unterschiedlichen Temperaturen von  $T = 5\text{ °C}$ ,  $20\text{ °C}$  und  $30\text{ °C}$  durchgeführt. Die Ausgangsstoffe sind bei der entsprechenden Temperatur vorgelagert worden. In Tab. 4.9 sind die Solltemperaturen und die gemessenen Mörteltemperaturen zusammengefaßt.

Tab. 4.9:      Mörteltemperaturen in Abhängigkeit des Mörtelalters

Zement	Solltemperatur T [°C]	Mörteltemperatur T [°C]		
		0 min	30 min	60 min
Z 1	5,0	13,0	14,4	15,1
Z 1	20,0	20,5	-	-
Z 1	30,0	30,5	25,0	20,2
Z 9	5,0	12,4	16,8	18,4
Z 9	20,0	22,3	21,5	20,4
Z 9	30,0	31,4	24,3	22,0
Z 11	5,0	13,0	16,7	18,2
Z 11	20,0	21,8	20,8	20,4
Z 11	30,0	30,3	25,3	22,3
Z 12	5,0	14,4	16,8	18,1
Z 12	20,0	20,7	20,2	19,8
Z 12	30,0	32,0	26,2	22,8
Z 13	5,0	12,0	15,5	16,3
Z 13	20,0	19,8	-	-
Z 13	30,0	30,9	24,9	22,4

Bei einer Solltemperatur von  $5\text{ °C}$  lag die Mörteltemperatur nach dem Mischen i.d.R. bei  $T = 13\text{ °C}$ . Dies ist auf die höhere Umgebungstemperatur ( $T = 20\text{ °C}$ ), Mischenergie und Reaktionswärme in den ersten Minuten zurückzuführen. Bei Solltemperaturen von  $T = 5\text{ °C}$

und 30 °C strebte die Mörteltemperatur innerhalb der ersten Stunde gegen  $T = 20\text{ °C}$ . Dies entsprach der Lufttemperatur im Labor. Der Vorratsbehälter konnte nicht separat temperiert werden.

Bei den Versuchen lag das Hauptaugenmerk in der Bestimmung von Fließfähigkeit, Volumenänderung von Wasserabsondern. Die Ergebnisse der Eignungsprüfungen für unterschiedliche Temperaturen sind in Tab. A-4.4 angegeben. Anschließend werden die Ergebnisse detaillierter betrachtet.

#### 4.5.2 Fließfähigkeit

Die Fließfähigkeit nahm bei den vergleichsweise steifen Mörteln, hergestellt mit den Zementen Z 9, Z 11 und Z 12, mit der Mörteltemperatur deutlich zu. Die Verschlechterung der Fließfähigkeit ist in den Bildern 4.28 - 4.35 stellvertretend durch die Tauchzeit dargestellt. Die Bilder zeigen die Tauchzeit in Abhängigkeit von Mörtelalter und Temperatur.

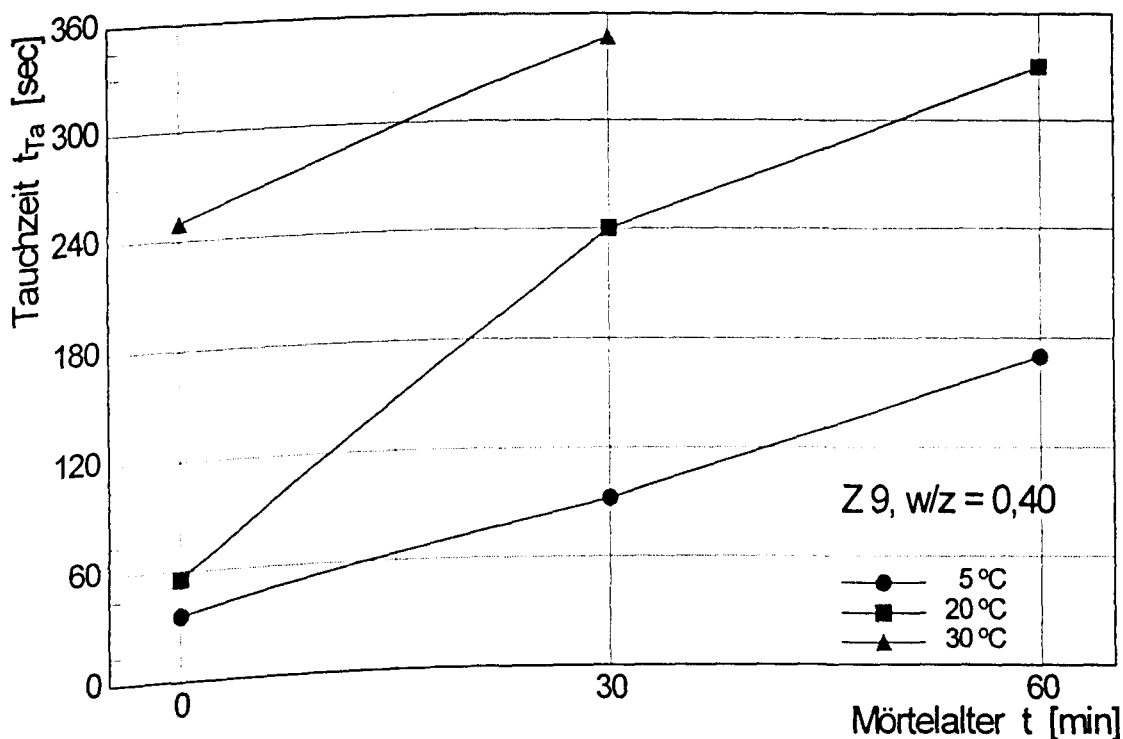


Bild 4.28: Tauchzeit in Abhängigkeit von Mörtelalter und Temperatur für den Mörtel mit Zement Z 9

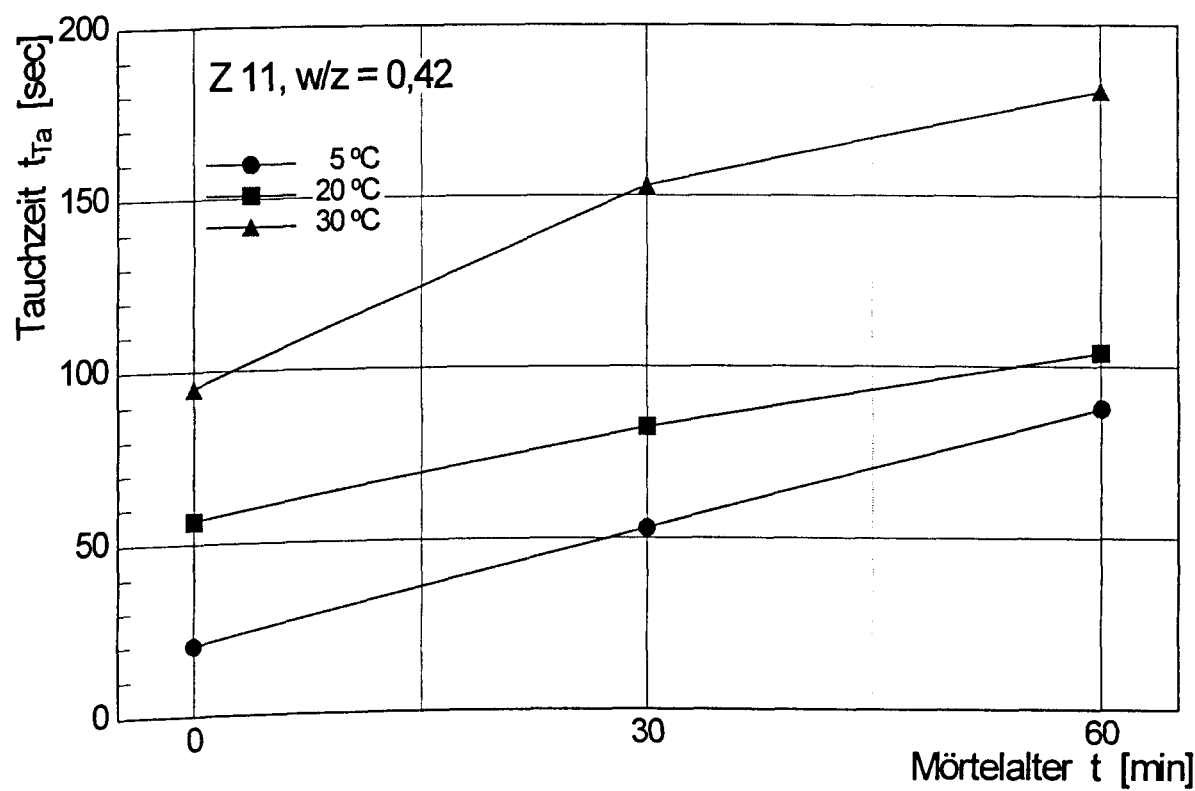


Bild 4.29: Tauchzeit in Abhängigkeit von Mörtelalter und Temperatur für den Mörtel mit Zement Z 11

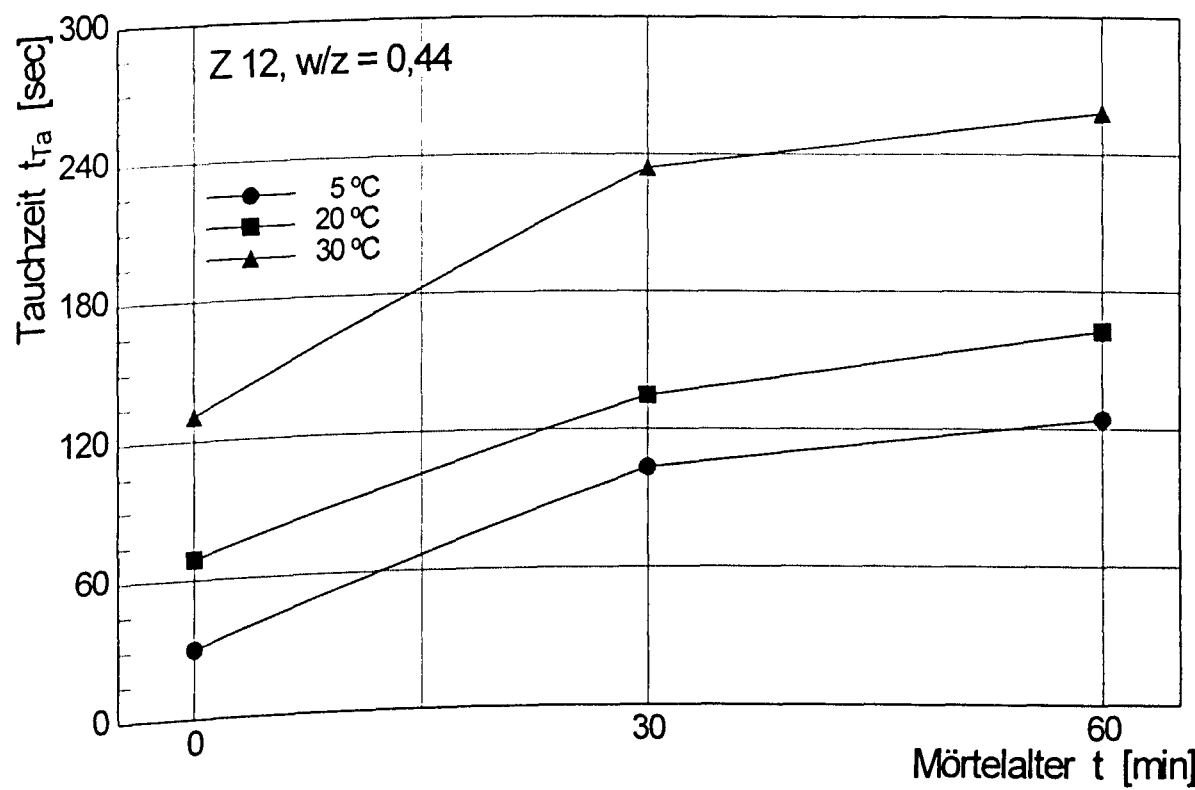


Bild 4.30: Tauchzeit in Abhängigkeit von Mörtelalter und Temperatur für den Mörtel mit Zement Z 12

Bilder 4.31 und 4.32 zeigen die Tauchzeiten für die dünnflüssigeren Mörtel, hergestellt mit Zement Z 1 und Z 13. Der Temperatureinfluß auf die Tauchzeit war bei diesen Mörteln nicht so ausgeprägt.

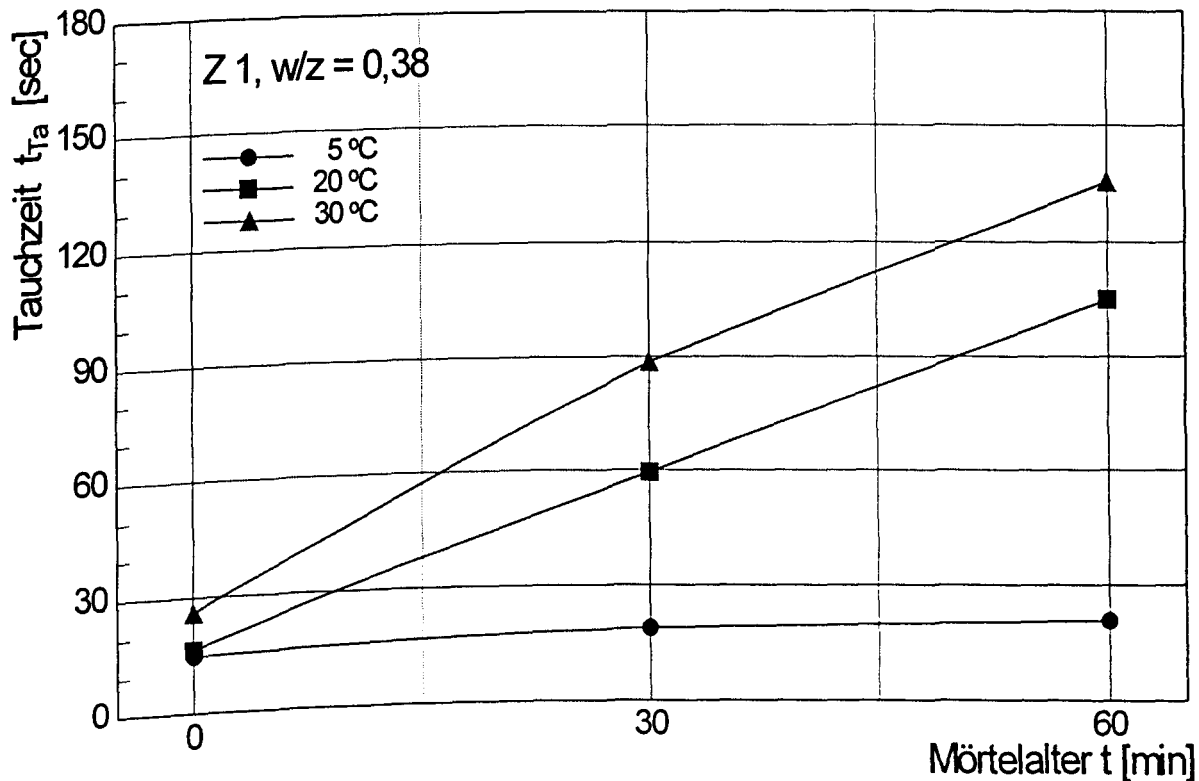


Bild 4.31: Tauchzeit in Abhängigkeit von Mörtelalter und Temperatur für den Mörtel mit Zement Z 1

Bei dem Mörtel mit Zement Z 1 nahm die Tauchzeit innerhalb der ersten Stunde bei  $T = 5\text{ °C}$  fast nicht zu. Das gleiche gilt für den Mörtel mit Zement Z 13 bei den Temperaturen  $T = 5\text{ °C}$  und  $20\text{ °C}$ . Bei höheren Temperaturen nahm die Tauchzeit deutlich zu.

Bei den Mörteln mit Zement Z 9, Z 11 und Z 12 nahm die Tauchzeit in der ersten Stunde fast unabhängig von der Temperatur um den gleichen Wert zu. Es muß allerdings berücksichtigt werden, daß sich der bei  $T = 5\text{ °C}$  hergestellte Mörtel innerhalb der ersten Stunde erwärmte und der bei  $T = 30\text{ °C}$  hergestellte Mörtel aufgrund des Rührens im nicht temperierten Vorratsbehälter abkühlte.

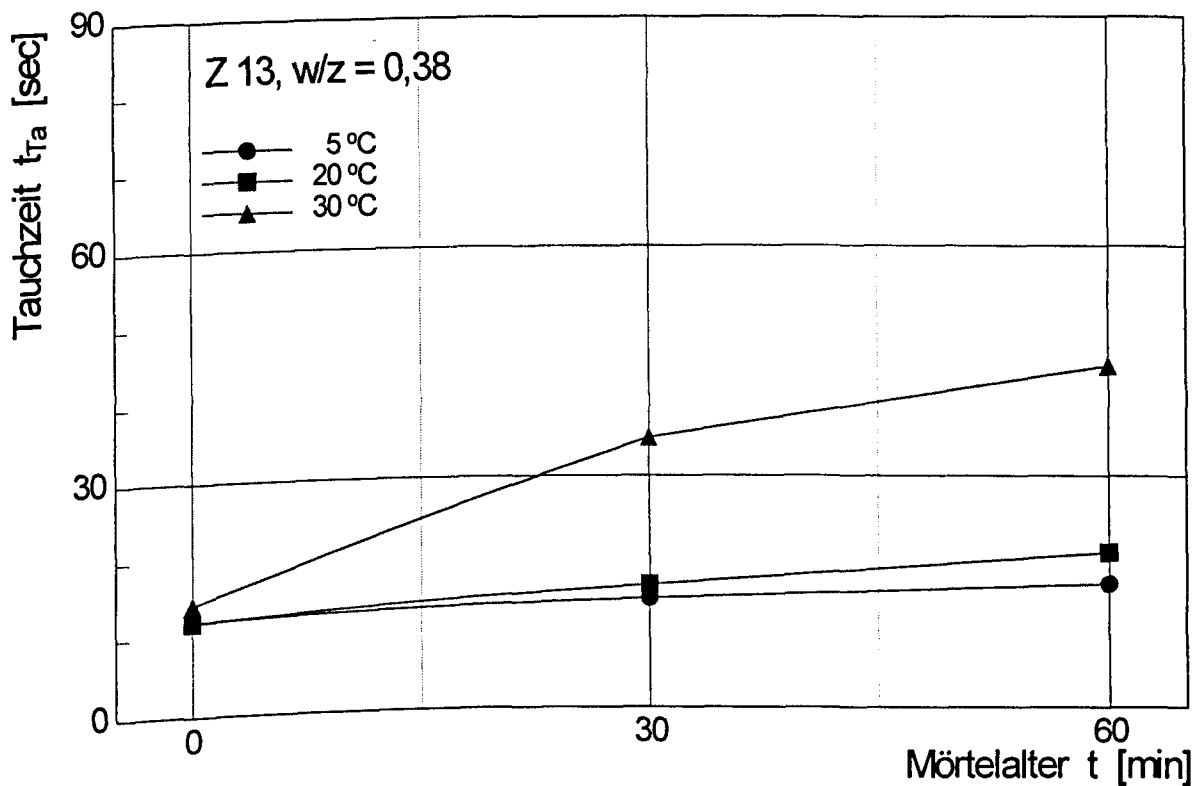


Bild 4.32: Tauchzeit in Abhängigkeit von Mörtelalter und Temperatur für den Mörtel mit Zement Z 13

Insgesamt ist festzustellen, daß die Ausgangstemperatur bei steifen Mörteln erheblichen Einfluß auf die Tauchzeit direkt nach dem Mischen hat. Der Anstieg der Tauchzeit ist bei steifen Mörteln jedoch weniger von der Mörteltemperatur abhängig. Bei sehr dünnflüssigen Mörtel beeinflusst die Ausgangstemperatur die Tauchzeit nach dem Mischen vergleichsweise wenig. Dafür nimmt die Tauchzeit bei erhöhter Temperatur innerhalb der ersten Stunde schneller zu.

#### 4.5.3 Volumenänderung

Bild 4.33 zeigt die Volumenänderung für die untersuchten Mörtel in Abhängigkeit der Temperatur. Alle Mörtel sind einheitlich mit EH 1 hergestellt worden. Die Mörtel waren in die bereits erwähnten Meßzylindern gefüllt und lagerten in der Klimakammer. Die Temperaturen stellen somit die jeweilige Umgebungstemperatur während der Versuchsdauer von  $t = 3$  h dar.

Die Volumenänderung nahm bei allen Mörteln bei steigender Temperatur zu. Die Mörtelversuche mit der Standardrezeptur ergab, daß die Volumenänderung maßgeblich von der Quellwirkung der Einpreßhilfe bestimmt wird. In der Praxis ist bekannt, daß die Quellwirkung von der Temperatur abhängt. Deswegen wird für die Mörtelherstellung bei



tiefen Temperaturen eine Einpreßhilfe mit erhöhter Quellwirkung (EH 4 anstatt EH 1) empfohlen.

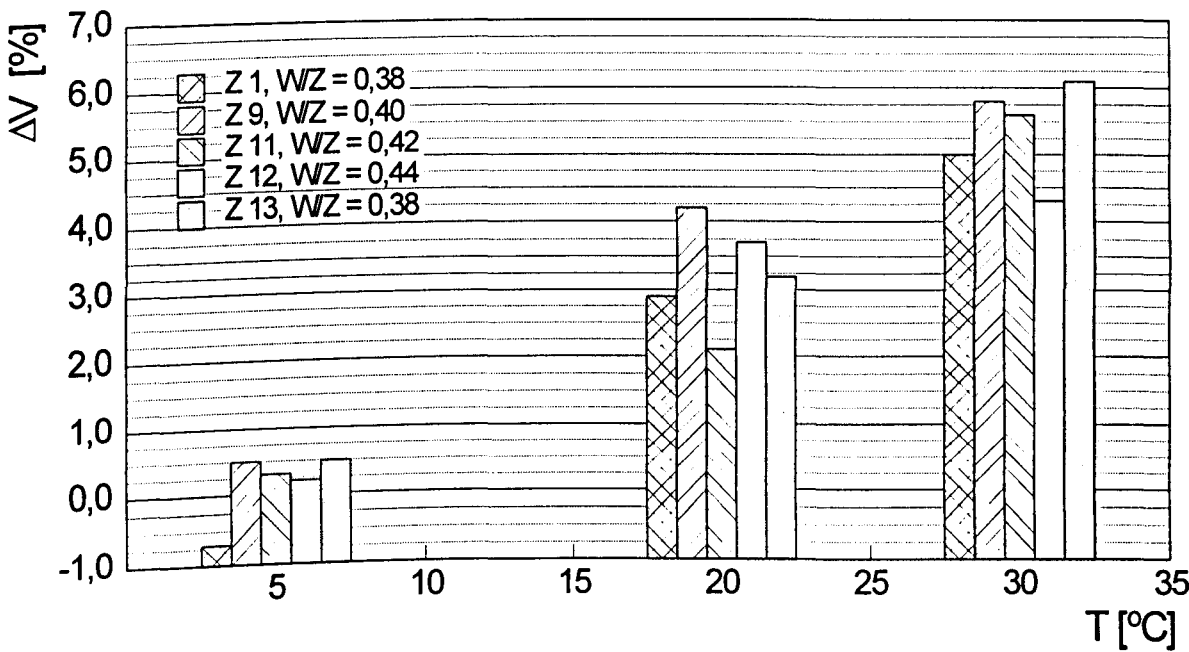


Bild 4.33: Volumenänderung der untersuchten Mörtel in Abhängigkeit der Frischmörtel- bzw. Lagerungstemperatur

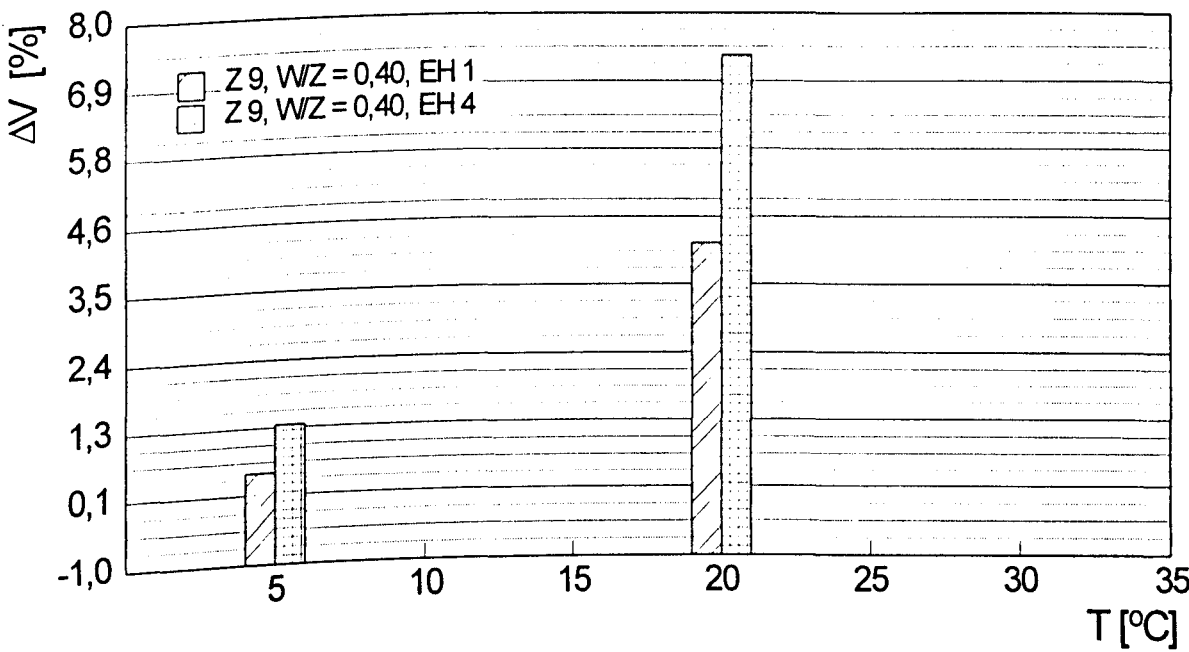


Bild 4.34: Volumenänderung für Mörtel mit Z 9 bei Verwendung von EH 1 und EH 4

Bild 4.34 zeigt die Volumenänderung für den Mörtel mit Z 9 bei Verwendung von EH 1 und EH 4. Während mit EH 1 bei  $T = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$  lediglich eine Volumenänderung von  $\Delta V = 0,4\text{ }\%$

erreicht wurde, lag die Volumenänderung mit EH 4 bei  $\Delta V = 1,25 \%$ . Die zulässige Volumenänderung von  $\Delta V = 7,0 \%$  wurde mit EH 4 bei  $T = 20 \text{ °C}$  überschritten.

#### 4.5.4 Wasserabsondern

In Bild 4.35 ist das Wasserabsondern der unterschiedlichen Mörtel für unterschiedliche Temperaturen dargestellt. Das Wasserabsondern nahm bei allen Mörteln mit abnehmender Temperatur zu. Bei den steifen Mörteln mit Zement Z 9, Z 11 und Z 12 war das Wasserabsondern deutlich kleiner als bei den dünnflüssigen Mörteln mit Zement Z 1 und Z 13. Dieses trifft insbesondere für Temperaturen von  $T = 5 \text{ °C}$  und  $20 \text{ °C}$  zu.

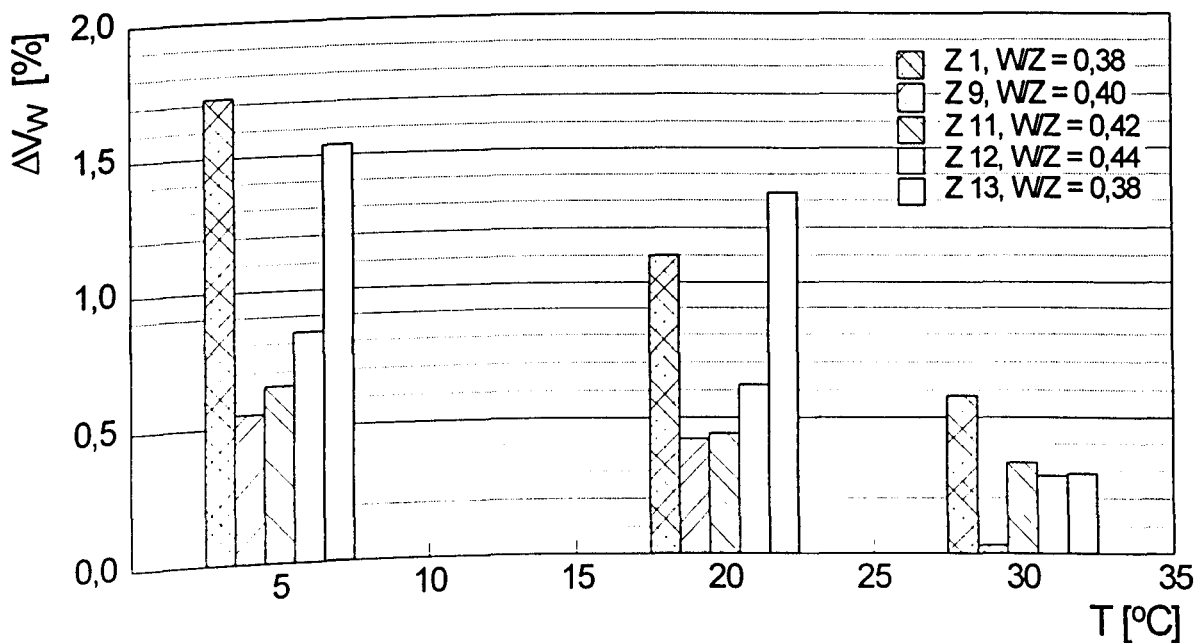


Bild 4.35: Wasserabsondern der untersuchten Mörtel in Abhängigkeit der Frischmörtel- bzw. Lagerungstemperatur

Eine mögliche Ursache für das stärkere Wasserabsondern bei tiefen Temperaturen ist, daß die Reaktion zwischen Zement und Wasser langsamer verläuft. Das Wasser wird dadurch nicht so schnell an die Zementkörner gebunden. Überschüssiges Wasser kann sich absetzen. Das verstärkte Wasserabsondern kann evtl. durch Zugabe von MS verringert werden. Durch die große spezifische Oberfläche von MS kann Wasser zwischen den Zementkörnern besser gebunden werden.

## 4.6 Versuchsergebnisse mit Mikrozzement

Der verwendete Mikrozzement hatte einen W/Z-Wert von 0,85. Die spezifische Oberfläche nach Blaine betrug  $11.000 \text{ cm}^2/\text{g}$ . Die Ergebnisse der Mörtelprüfungen sind in Tab. A-4.4 zusammengestellt. Die Tauchzeit nach dem Mischen lag mit  $t_{Ta} = 10 \text{ sec}$  deutlich unter der kleinsten zulässigen Tauchzeit nach Norm.

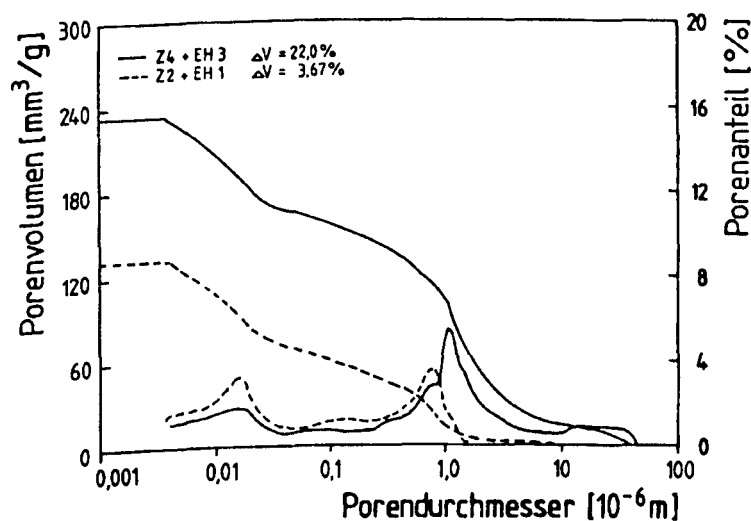
Der Mörtel mit Mikrozzement zeigte eine geringe Volumenzunahme  $\Delta V = 0,32 \%$ . Das Wasserabsondern war mit  $\Delta V_w = 0,05 \%$  ausgesprochen klein. Die Druckfestigkeit betrug  $f_{c,28} = 24,7 \text{ N/mm}^2$ . Sie war damit kleiner als die nach Norm geforderte Druckfestigkeit bei Einpreßmörteln.

Mikrozzement erfüllt die an Einpreßmörtel gestellten Anforderungen nicht. Er ist deswegen für das Verpressen von Spanngliedern nicht zu empfehlen. Durch die gute Fließfähigkeit und das geringe Wasserabsondern ist er evtl. für die Sanierung teilweise verfüllter Spannglieder einsetzbar, wenn es darum geht, kleine Hohlräume oder Zwickel nachträglich zu verfüllen.

## 4.7 Weitere Laborversuche

### 4.7.1 Ergebnisse der Porosimetrie-Untersuchungen

Bei der Porosimetrie-Untersuchung interessierte die Porenradienverteilung und der Zusammenhang zwischen Volumenzunahme und Porenvolumen. Bei einem großen Porenvolumen ist der Transportwiderstand des Mörtels gegenüber aggressiven Stoffen geringer.



Bilder 4.36: Porenradienverteilung und Porenvolumen für zwei unterschiedliche Mörtel

Bild 4.36 zeigt exemplarisch die Porenradienverteilung für zwei verschiedene Mörtel. Bei dem Mörtel mit Zement Z 4 + EH 3 war die Volumenänderung mit  $\Delta V = 22,0 \%$  deutlich größer als die zulässige Volumenänderung. Aufgrund der großen Volumenänderung war auch das Porenvolumen deutlich größer als beim Mörtel mit Zement Z 2 + EH 1.

Bild 4.37 zeigt den Zusammenhang zwischen Volumenänderung und Porosität. Bei den Einpreßmörteln mit EH 1 wurde das Porenvolumen von der Volumenzunahme nicht signifikant beeinflusst. Bei einer mittleren Volumenzunahme von  $\Delta V = 4,0 \%$  lag die Porosität bei etwa  $P = 19,0 \text{ Vol.}\%$ .

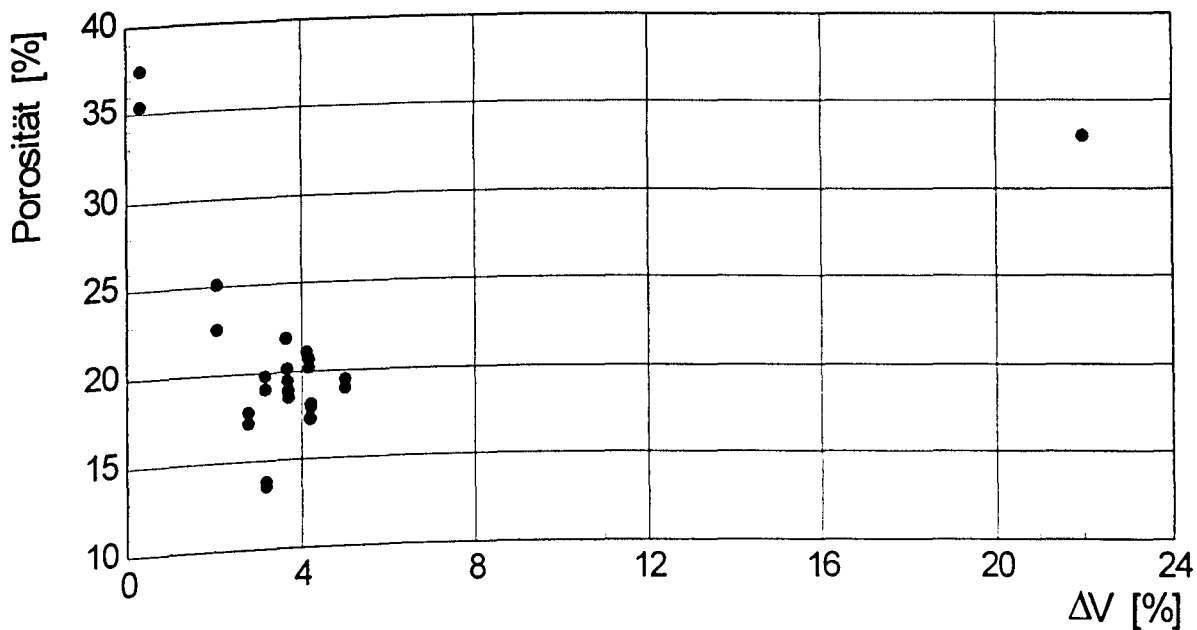


Bild 4.37: Zusammenhang zwischen Volumenänderung und Porosität

Deutliche Unterschiede ergaben sich beim Mikrozement und bei Verwendung von EH 3. Beim Mikrozement betrug die Porosität i.M.  $P = 36,4 \text{ Vol.}\%$  bei einer Volumenzunahme von  $\Delta V = 0,32 \%$ . Die vergleichsweise hohe Porosität bei geringer Volumenänderung ist auf ein großes Porenvolumen infolge des hohen W/Z-Wertes zurückzuführen.

Bei Verwendung von Z 4 in Verbindung mit EH 3 wurde aufgrund der hohen Quellwirkung der Einpreßhilfe eine Porosität von  $P = 32,9 \text{ Vol.}\%$  bei einer Volumenänderung von  $\Delta V = 22,0 \%$  erreicht.

#### 4.7.2 Ergebnisse der Filterpressenversuche

Mit den Filterpressenversuchen sollte überprüft werden, wie stabil die Mörtel gegenüber dem Auspressen von Wasser sind. In Hüllrohren kann es durch die Zwickel zwischen den

Spannstählen zum Auspressen von Wasser kommen. Dadurch können Verstopfer verursacht werden.

Die Ergebnisse der Filtratwasserabgabe sind in in Tab. A-4.14 für die Mörtel der Standardrezeptur angegeben. Bild 4.38 zeigt die Ergebnisse graphisch. Die ausgepreßte Wassermenge nahm mit der Tauchzeit geringfügig ab. Das läßt darauf schließen, daß bei steifen Mörteln ein größerer Wasseranteil fest an die Zementkörner gebunden ist.

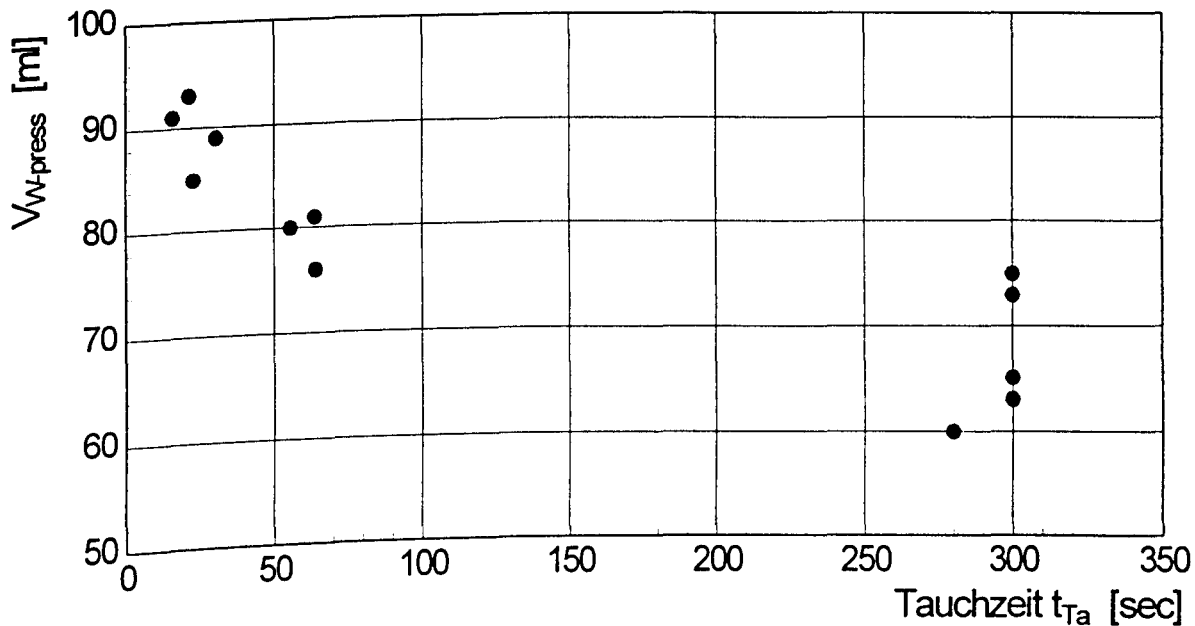


Bild 4.38: Ausgepreßtes Wasservolumen  $V_{Wpress}$  in Abhängigkeit der Tauchzeit nach dem Mischen

Bei Mörteln, die mit MS modifiziert wurde, war die ausgepreßte Wassermenge deutlich geringer als ohne Mikro-Silika-Zugabe. Nach dem Öffnen des Drucktopfes zeigte sich am Filterpapier ein ausgeprägter Filterkuchen. Der übrige Mörtel war hingegen noch dünnflüssig. Die Ausbildung des Filterkuchens ist auf den großen Feinanteil des Mikro-Silikas zurückzuführen.

Der Filterpressenversuch bildet aufgrund der starken Filterwirkung des Filterpapiers die mögliche Filterwirkung bei enger Packungsdichte des Spannstahls im Hüllrohr schlecht ab. Die ausgepreßte Wassermenge unterscheidet sich bei Einpreßmörteln hergestellt nach DIN 4227, T. 5 nur wenig. Der Filterpressenversuch brachte deswegen nicht den erhofften Aufschluß über die auspreßbare Wassermenge im Hüllrohr.

## 4.8 Erfahrungen mit den Mixchern

### 4.8.1 Handmischer

Für Laborversuche werden oft Handmischer bei kleinen Chargen eingesetzt. Besitzen diese ein hoctouriges Mischwerk, dann werden Frischmörteleigenschaften wie bei Verwendung eines Kolloidalmischers erzielt. Es ist entscheidend, daß im Mischbehälter große Turbulenzen entstehen. Der Mörtel sollte nach dem Mischen durch ein Sieb mit einer Maschenweite von 2 - 3 mm gegeben werden. Auf diese Weise können kleinere Zementklumpen (Durchmesser ca. 3 mm) aufgefangen werden. Der Mörtel wird homogener.

### 4.8.2 Kolloidalmischer

Für die Versuche wurden zwei Kolloidalmischer für den Baustelleneinsatz verwendet. Der im Rahmen der Versuche überwiegend eingesetzte Mischer O hatte neben der Wirbelradpumpe ein kleines Flügelrad ( $\varnothing \approx 20$  cm) im Mischbehälter. Dieses Flügelrad drehte hoctourig mit einer Drehzahl von ca. 1.000 U/min. Unterstützt durch Leitbleche bewirkte das Flügelrad eine turbulente Strömung im Mischbehälter. Der Mörtel wurde durch das Wirbelrad parallel zur Mischung durch die Wirbelradpumpe intensiv vor- bzw. nachgemischt.

Der andere Mischer (Mischer S) hatte anstatt des hoctourigen Flügelrades ein langsam rotierendes Rührwerk 50 - 100 U/min. Diese Rührwerke hatten einen Durchmesser von ( $\varnothing \approx 50$  cm). Das Rührwerk bewirkte, daß größere Zementklumpen zerkleinert wurden und von der Wirbelradpumpe angesaugt werden konnten. Die Strömung im Mischbehälter war bei einem langsamen Rührwerk nicht so turbulent wie beim hoctourigen Flügelrad.

Für das homogene Mischen ist die Leistung der Wirbelradpumpe entscheidend. Bei den hier eingesetzten Mixchern betrug die Förderleistung der Wirbelradpumpe ca. 300 l/min. Die zugehörige Mischbehältergröße betrug ca. 100 l. Bei Herstellung einer Charge bestehend aus 100 kg Zement und 40 kg Wasser ( $V \approx 72$  l Mörtel) wird der Mörtel ca. 4 mal pro Minute umgewälzt. Bei einer baustellenüblichen Mischzeit von ca. 2 min. fließt der Mörtel insgesamt 8 mal durch die Wirbelradpumpe.

Bei den Versuchen wurde während des Mischens der Temperaturanstieg des Mörtels gemessen. Neben der Wärmefreisetzung durch den Hydratationsbeginn ist die Temperaturerhöhung ein Maß für den Energieeintrag durch den Mischer. Die Temperaturmessung wurde bei der Mörtelherstellung mit unterschiedlichen Zementen

ausgeführt. Nahezu unabhängig vom Zement ergab sich eine Temperaturerhöhung des Mörtels von ca.  $\Delta T = 1 \text{ K}$  je Mischminute (bei 35 l Mischung).

Insgesamt ist festzustellen, daß Kolloidalmischer nach dem heutigen Stand der Technik für Herstellung von Einpreßmörteln zu bevorzugen sind. Sie gewährleisten die Herstellung sehr homogener Mörtel.

#### 4.8.3 Hinweise zur Mischergestaltung

##### Zement- und Wasserzugabe

Die Herstellung eines gleichmäßigen Mörtels erfordert die genaue Dosierung der Bestandteile. Die Wasserzugabe erfolgt bei den meisten Mixchern durch eigene Wasserbehälter, bei denen die Wassermenge durch Überlauf oder elektrische Schwimmschalter abgemessen wird. Die Abmeßgenauigkeit sollte bei unter 1,0 % liegen. Bezogen auf eine Mischung bestehend aus 100 kg Zement und 40 l Wasser entspricht diese einer Genauigkeit von unter 0,4 l. Weiterhin sollte sichergestellt werden, daß sich nach Reinigung o.ä. kein Restwasser im Mischer befindet. Misch- und Vorratsbehälter sollten deswegen über eine leicht zugängliche Tiefpunktentleerung verfügen.

Üblicherweise erfolgt die Zementzugabe mit Sackzement. Nach DIN 1164, T. 1 darf das Sackgewicht von 50 kg-Säcken um maximal  $\pm 2,0 \%$  vom Sollgewicht abweichen. Eine Abweichung des Sackgewichtes vom Sollgewicht um 2,0 % hat bei exakter Wasserdosierung eine Änderung des W/Z-Wertes von  $\Delta W/Z = 0,01$  zur Folge. Im Rahmen der Versuche wurde das Sackgewicht der Zemente überprüft. Es betrug i. M. 49,95 kg bei geringer Streuung.

##### Vermeiden von Zementklumpen

Wird der Zement dem Wasser sehr schnell zugegeben, können große Zementklumpen entstehen. Aufgrund der Brückenbildung zwischen den Zementkörnern kann das Wasser nicht in das Innere der Klumpen eindringen. Zur Vermeidung von Zementklumpen sind Kolloidalmischer mit einem zusätzlichen Mischwerkzeug im Mischbehälter ausgestattet. Ziel ist es, die Zementklumpen entweder mit einem hochoberflächigen Flügelrad durch Turbulenzen oder mit einem langsamen Rührwerk durch Scherwirkung zu zerkleinern, so daß der Zement von der Wirbelradpumpe angesaugt werden kann. Da das Aufschlagen größerer Zementklumpen durch den Mischer nicht immer gelingt - das ist insbesondere bei Zementen mit hohem Wasseranspruch und entsprechend schlecht fließfähigen Mörteln der Fall - ist

eine langsame Zementzugabe durch ein Sieb (Maschenweite 2 - 5 cm) ober durch einen entsprechenden Spalt sinnvoll.

Kolloidalmischer stellen nach derzeitigen Erkenntnissen das beste Mischsystem dar. Der Mischbehälter sollte mit einem eigenen Rührwerk ausgestattet sein. Bei der Ausbildung des Mischbehälters sollte darauf geachtet werden, daß dieser konusförmig zur Ansaugöffnung der Wirbelradpumpe ausgebildet und an der tiefsten Stelle ist, um sicherzustellen, daß der Mörtel zwangsläufig die Mischpumpe passiert.

#### 4.9 Zusammenfassung

Es wurden Mörtelversuche mit 14 verschiedenen Zementen ausgeführt. Für die Versuche wurde eine Standardrezeptur verwendet, um den Einfluß des Zementes auf die Mörtel Eigenschaften zu quantifizieren. Bei den Mörteln wurden vorrangig Fließfähigkeit, Volumenänderung und Wasserabsondern gemessen. Begleitend wurden die chemisch-physikalischen Zementeigenschaften untersucht. Anhand der Ergebnisse aus den Mörtelversuchen mit der Standardrezeptur und den chemisch-physikalischen Zementuntersuchungen wurden Zusammenhänge zwischen Zement- und Mörtel Eigenschaften aufgezeigt. Weiterhin wurde der Einfluß von Mörtelmodifikationen und verschiedenen Temperaturen auf die Mörtel Eigenschaften untersucht. Die verwendeten Mischer wurden im Hinblick auf die Herstellung eines homogenen Mörtels beurteilt.

Die Ergebnisse der Mörtelversuche können wie folgt zusammengefaßt werden:

- Fließfähigkeit und Wasserabsondern hängen entscheidend vom verwendeten Zement ab.
- Die Volumenänderung hängt maßgeblich von der Quellwirkung der Einpreßhilfe ab.
- Die Ergebnisse der chemischen Analyse sind bei naß-chemischer Analyse und RFA nicht identisch. Entsprechend treten Unterschiede in den Klinkerbestandteilen nach Bogue auf.
- Eine eindeutige Korrelation zwischen  $C_3A$ -Gehalt und Fließfähigkeit ist nicht erkennbar. Mit einem rechnerisch  $C_3A$ -freien Zement konnte jedoch ein gut fließfähiger Mörtel hergestellt werden. Dieser steifte vergleichsweise schnell an.
- Die Fließfähigkeit des Mörtels nahm mit steigender  $C_3A$ -Reaktivität des Zementes ab.
- Die Fließfähigkeit des Mörtels nahm mit zunehmendem  $C_2S$ -Gehalt des Zementes ab.
- Die Fließfähigkeit des Mörtel nahm mit steigendem Alkaligehalt des Zementes ab.



- Die Fließfähigkeit des Mörtels nahm mit zunehmendem Wasseranspruch des Zementes ab.
- Die Fließfähigkeit des Mörtels nahm mit zunehmender Hydrationswärme ab.
- Die Fließfähigkeit des Mörtels nahm mit steigendem Wasseranspruch des Zementes ab.
- Das Ergebnis der Korngrößenanalyse mit einem Lasergranulometer hängt von der Dispergiermethode ab. Trockendispergierung führt zu einem größeren Feinkornanteil als Naßdispergierung.
- Die Fließfähigkeit des Mörtels nahm bei Verwendung von Zementen großer Mahlfineinheit ab. Die große Mahlfineinheit wird durch die spezifische Oberfläche nach Blaine, die Korngröße bei 50 % Siebdurchgang ( $x_{50\%}$ ) sowie im Kornanteil  $d < 15 \mu\text{m}$  deutlich. Es sollten Zemente ausgewählt werden, bei denen  $x_{50\%} > 14,5 \mu\text{m}$ ; entsprechend sollte der Siebdurchgang bei einer Korngröße  $d = 15 \mu\text{m}$  nicht größer sein als 65 %; für den Blaine-Wert gilt  $O_{\text{spez.}} < 4.000 \text{ cm}^2/\text{g}$ .
- Das Wasserabsondern nahm bei wasserreichen Mörteln mit geringer Tauchzeit und bei Verwendung von Zementen mit geringem Feinkornanteil zu.

Bei der Zementauswahl muß berücksichtigt werden, daß sich die genannten Merkmale gegenseitig beeinflussen. Die Auswirkungen können sich summieren oder aufheben. Es wird deswegen nicht gelingen, die Mörtелеigenschaften anhand der chemisch-physikalischen Zementmerkmale vollständig abzuschätzen. Vielmehr beeinflussen alle Merkmale die Mörtелеigenschaften gemeinsam.

Wenn von mehreren zur Auswahl stehenden Zementen einer für das Verpressen von Spanngliedern ausgewählt werden soll, sollten die Zemente anhand der aufgezeigten Merkmale miteinander verglichen werden. Die Wahrscheinlichkeit einen qualitativ guten Einpreßmörtel herzustellen ist bei Verwendung jenes Zementes am größten, der in der Summe die günstigsten chemisch-physikalischen Eigenschaften aufweist.

Grundsätzlich ist festzustellen, daß

- auch Mörtel mit geringer Tauchzeit  $t_{\text{Ta}} < 30 \text{ sec}$  für das Verpressen geeignet sind. Das Wasserabsondern kann bei guter Fließfähigkeit durch einen geeigneten Feinkornanteil minimiert werden.
- sich das Fließverhalten im Spannglied bei Tauchzeiten um  $t_{\text{Ta}} \approx 40 \text{ sec}$  ändert (vergl. Kap. 7).

- auch Mörtel mit einer Tauchzeit  $t_{Ta} > 80 \text{ sec}$  nach dem Mischen noch zuverlässig verpreßt werden können. Die Tauchzeit nach 30 Minuten überschreitet dann die zulässige Tauchzeit ( $t_{Ta} = 80 \text{ sec}$ ) nach Norm [21], [29], [31]. Bauaufsichtliche Zulassungen für Mischer erlauben derzeit schon Tauchzeiten bis  $t_{Ta} = 180 \text{ sec}$ . Die Anforderung der Norm mit einer zulässigen Tauchzeit von  $t_{Ta} = 80 \text{ sec}$  nach  $t = 30 \text{ min}$  ist damit in Frage zu stellen. Eine maximale Tauchzeit von  $t_{Ta} = 80 \text{ sec}$  nach dem Mischen scheint demgegenüber gerechtfertigt, da der Mörtel nach  $t = 30 \text{ min}$  für das Verpressen sonst zu steif wird.
- Durch die Zugabe von FM konnte die Fließfähigkeit in Abhängigkeit des Wasseranspruchs des Zementes eingestellt werden. Die Gefahr der Wasserabsonderung wird dann gemindert.
- Die Einpreßhilfe sollte auf die Zementeigenschaften abgestimmt sein, z.B. unterschiedliche Fließmittelgehalte in Abhängigkeit vom Wasseranspruch des Zementes.
- Durch die Zugabe von Kunststoffdispersion konnte die Fließfähigkeit über einen längeren Zeitraum stabil eingestellt werden. Die Verarbeitungsdauer wurde bei gleichbleibenden Eigenschaften verlängert. Andere Mörtel Eigenschaften, wie Volumenänderung, Wasserabsondern und Druckfestigkeit wurden nicht negativ beeinflusst.
- Durch Zugabe von MS stieg der Wasseranspruch des Mörtels. Dieses ist auf die große spezifische Oberfläche des Mikrosilikas zurückzuführen. Bei Zugabe von 1,0 M.-% MS unterschied sich die Tauchzeit kaum von einem Mörtel ohne MS-Zugabe. Bei Zugabe von 5,0 M.-% MS nahm die Fließfähigkeit erheblich ab. Die Fließfähigkeit ist dann mit FM einzustellen, vergl. [43], [78]. Das Wasserabsondern wurde durch die Zugabe von MS günstig beeinflusst. Eine deutliche Verringerung der abgesonderten Wassermenge war schon bei Zugabe von 1,0 M.-% MS erkennbar.
- Die Fließfähigkeit nahm mit steigender Mörteltemperatur ab.
- Die Volumenänderung wurde mit zunehmender Temperatur größer.
- Das Wasserabsondern nahm mit abnehmender Temperatur zu.

## 5 ERFAHRUNGEN MIT DEN PRÜFVERFAHREN

### 5.1 Allgemeines

Nach Einführung der europäischen Norm pr EN 445 [29] und pr EN 447 [31] sind Änderungen bei den Prüfverfahren für Einpreßmörtel möglich. Die verschiedenen Prüfverfahren sollten anhand der Mörtelversuche im Hinblick auf ihre Aussagekraft und Eignung unter Baustellenbedingungen näher untersucht werden. Über die Erfahrungen wird nachfolgend berichtet.

### 5.2 Erfahrungen mit den Prüfverfahren zur Fließfähigkeit

#### Tauchgerät

Bei den untersuchten Mörteln lag die Tauchzeit nach dem Mischen zwischen  $15 \text{ sec} \leq t_{Ta} \leq 300 \text{ sec}$ . In der Praxis sind Tauchzeiten von  $30 \text{ sec} \leq t_{Ta} \leq 180 \text{ sec}$  üblich. Die Tauchzeiten lagen somit in einem sehr breiten Bereich, so daß für die Beurteilung der Fließfähigkeit eine sehr differenzierte Aussage möglich war. Nachteilig beim Tauchgerät sind die sehr großen Tauchzeiten bei steifen Mörteln. Die Prüfung wird dadurch zeitaufwendig.

Insgesamt ist das Tauchgerät zur Prüfung der Fließfähigkeit von Einpreßmörtel sehr gut geeignet. Der Tauchversuch ist als Eignungs- und Güteprüfung für Prüfintervalle von mehreren Verpreßtagen besonders zu empfehlen. Auf die besonders gute Eignung des Tauchversuchs zur Prüfung der Fließfähigkeit im Vergleich zum Trichterversuch wird noch eingegangen.

#### Trichter mit 10 mm Auslaufdüse

Bei den untersuchten Einpreßmörteln lag die Auslaufzeit bei dem 10 mm-Trichter in der Grenze  $8 \leq t_{Tr} \leq 50 \text{ sec}$ . Das Zeitintervall ist deutlich kleiner als beim Tauchversuch. Die Fließfähigkeit kann mit dem 10 mm-Trichter deswegen nicht so differenziert beurteilt werden, wie mit dem Tauchversuch. Vorteilhaft beim Trichterversuch ist, daß er weniger aufwendig und schneller als der Tauchversuch auszuführen ist.

#### Trichter mit 4,76 mm Auslaufdüse

Bei den Versuchen konnte die Auslaufzeit mit dem 4,76 mm-Trichter nur bei sehr dünnflüssigen Mörteln gemessen werden. Als Anhaltswert gilt eine Tauchzeit  $t_{Ta} \leq 40 \text{ sec}$ .

Bei einigen dünnflüssigen Mörteln wurden die Tauchzeit  $t_{Ta}$  und die Auslaufzeit mit dem Marsh-Trichter  $t_{MT}$  nach dem Mischen gemessen. Bild 5.1 zeigt das Ergebnis. Tab. 5.1 gibt überschlägig den Zusammenhang zwischen Tauchzeit und Auslaufzeit (10 mm Trichter und 4,76 mm Trichter) an.

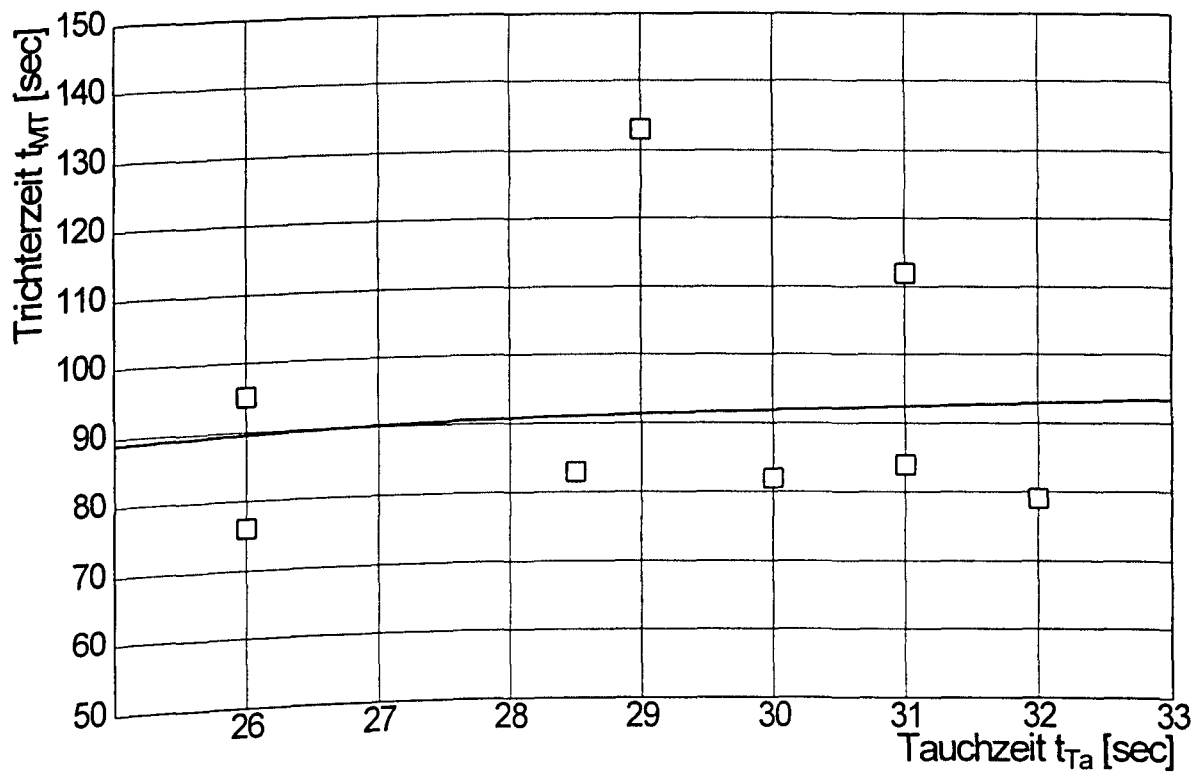


Bild 5.1: Vergleich von Tauchzeiten und Auslaufzeiten mit dem 4,76 mm-Trichter bei Verwendung verschiedener Mörtel

Tab. 5.1: Überschlägiger Zusammenhang zwischen Tauch- und Auslaufzeit (10 mm-Trichter) bei Einpreßmörtel

Auslaufzeit 10 mm-Trichter $t_{Tr}$ (sec)	Auslaufzeit 4,76 mm-Trichter $t_{MT}$ (sec)	Tauchen $t_{Ta}$ (sec)
10	70 - 100	20 - 30
15	350 - 480	45 - 80
20	-	120 - 150
25	-	180 - 220

Bei Tauchzeiten von  $t_{Ta} \approx 30$  sec betrug die Auslaufzeit für 1,0 l Mörtel i.M.  $t_{MT} = 93$  sec. Bei Tauchzeiten über  $t_{Ta} \approx 80$  sec kam es beim Marsh-Trichter zum Verstopfen der Düse. Der Marsh-Trichter ist insgesamt für die Prüfung von Einpreßmörteln wenig geeignet.

**Trichter mit 12,7 mm-Auslaufdüse**

Mit einem Mörtel wurde die Auslaufzeit nach dem Mischen parallel zu Tauchversuch mit 10 mm- und 12,7 mm-Trichter gemessen. Tab. 5.2 zeigt die Versuchsergebnisse.

Tab. 5.2: Vergleich von 12,7 mm-Trichter mit Tauchversuch und 10 mm-Trichter mit einem Mörtel hergestellt mit Zement Z 4

Mörtel mit Zement Z 4	Auslaufzeit 10,0 mm-Trichter $t_{Tr}$ [sec]	Auslaufzeit 12,7 mm-Trichter $t_{12,7}$ [sec]	Tauchzeit $t_{Ta}$ [sec]
Auslaufvolumen	1.000 ml	1.725 ml	-
Versuch 1	20,4	22,0	175
Versuch 2	15,8	16,0	138
Versuch 3	13,8	14,9	75

Der Vergleich der Auslaufzeiten beider Trichter (10 mm und 12,7 mm Auslaufdüse) zeigt, daß die Auslaufzeit beim 10 mm Trichter etwas kleiner ist als beim 12,7 mm-Trichter. Die Auslaufzeiten mit beiden Trichtern sind jedoch ähnlich. Die Genauigkeit der gemessenen Auslaufzeit liegt ohnehin bei etwa  $\pm 0,5$  sec. Näherungsweise kann davon ausgegangen werden, daß die Auslaufzeiten von 10 mm- und 12,7 mm-Trichter einander entsprechen.

**5.3 Vergleich von Tauchgerät und 10 mm-Trichter**

Bei Einführung der Normen prEN 445 und 447 stellen sich bezüglich der Anwendung von 10 mm-Trichter und Tauchgerät folgende Fragen:

- Läßt sich ein Zusammenhang zwischen Tauch- und Auslaufzeit (10 mm-Trichter) herstellen?
- Welcher Versuch ist zur Beurteilung der Fließfähigkeit unter Baustellenbedingungen besser geeignet?

Zur Beantwortung der Frage, ob sich ein Zusammenhang zwischen Tauch- und Auslaufzeit herstellen läßt, wurde zunächst ein Kalibrierversuch mit einer Newton'schen Flüssigkeit

durchgeführt. Als Newton'sche Flüssigkeit diene ein Gemisch aus Polyglykol und Wasser. Durch unterschiedlichen Polyglykol-Gehalt wurde die Viskosität der Gemische zwischen  $120 \leq \eta \leq 1.000 \text{ mPa}\cdot\text{s}$  eingestellt. Mit den Gemischen unterschiedlicher Viskosität wurden Tauch- und Trichterversuche ausgeführt. Zusätzlich wurden beide Versuche mit Glycerin wie beim Kalibrierversuch für das Tauchgerät ausgeführt. Die Ergebnisse der Kalibrierversuche mit Glycerin und dem Polyglykol-Wasser-Gemischen sind den Tab. 5.3 zusammengestellt.

Tab. 5.3: Kalibrierversuche mit Polyglykol-Wasser-Gemischen, bzw. Glycerin

Verhältnis P41/Wasser (%)	P41 [g]	Wasser [g]	$\eta$ Datenblatt [mPa s]	T [°C]	$t_{Ta}$ [sec]	$t_{Tr}$ [sec]	$t_{MT}$ [sec]	$\eta$ Viskosimeter [mPa s]
50	1.350,6	1.350,6	1.000	22,9	234	114,0	-	1.030
50				20,4	255	113,5	-	-
40	1.359,8	2.039,7	400	23,9	104	43,0	-	410
40				20,7	111,7	46,2	-	-
35		2.525,3	250	19,8	67,9	28,2	-	-
34,7			220		66,0		-	230 / 207
35				20,9	62,9	27,4	-	-
30		3.172,8	140	18,0	40,0	18,1	-	-
30				18,0	33,2	17,5	-	-
30				20,9	32,8	18,4	-	-
Glycerin	-	-	-	20,0	33,8	15,0	160,3	-

Im Bild 5.2 ist der Zusammenhang zwischen Tauch- und Auslaufzeit mit den Polyglykol-Wasser-Gemischen dargestellt. Es ist zu erkennen, daß zwischen Tauch- und Auslaufzeit bei Verwendung von Newton'schen Flüssigkeiten ein linearer Zusammenhang besteht.

Die Viskosität  $\eta$  der Polyglykol-Wasser-Gemische wurde mit einem Rotationsviskosimeter (Fa. Haake) gemessen. Im Bild 5.3 sind die gemessenen Tauchzeiten und die dynamischen Viskositäten gegenübergestellt.

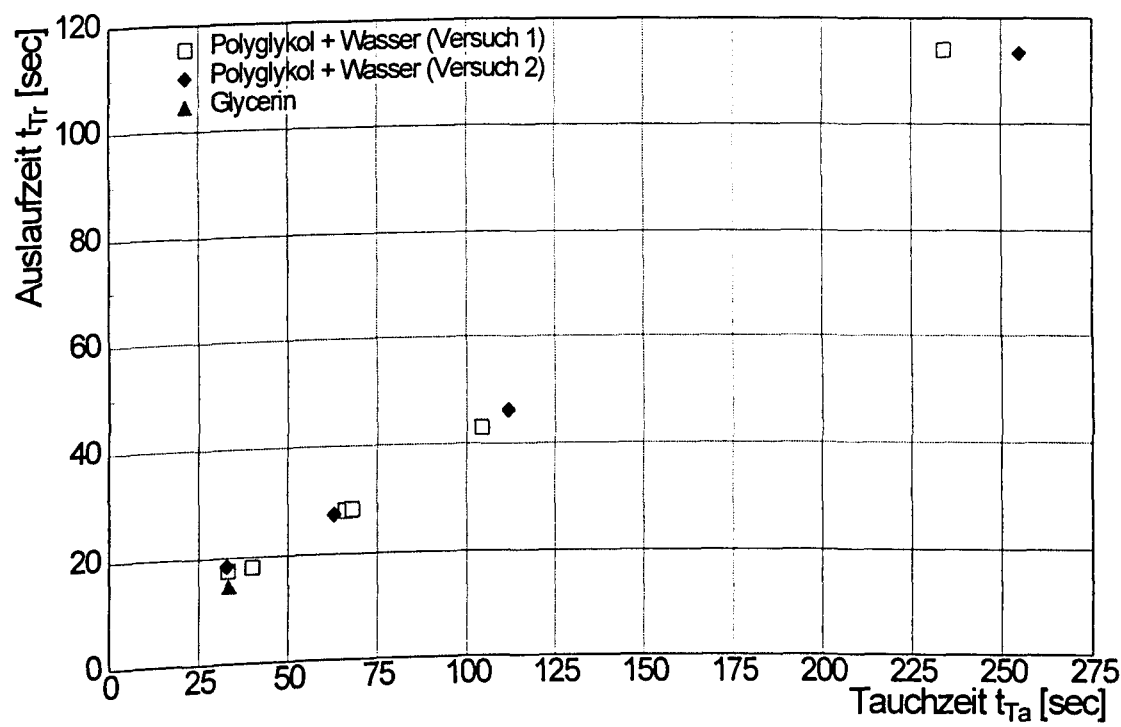


Bild 5.2: Zusammenhang zwischen Tauchzeit und Auslaufzeit (10 mm-Trichter) mit Polyglykol-Wasser-Gemisch (Newton'sche Flüssigkeiten), bzw. Glycerin

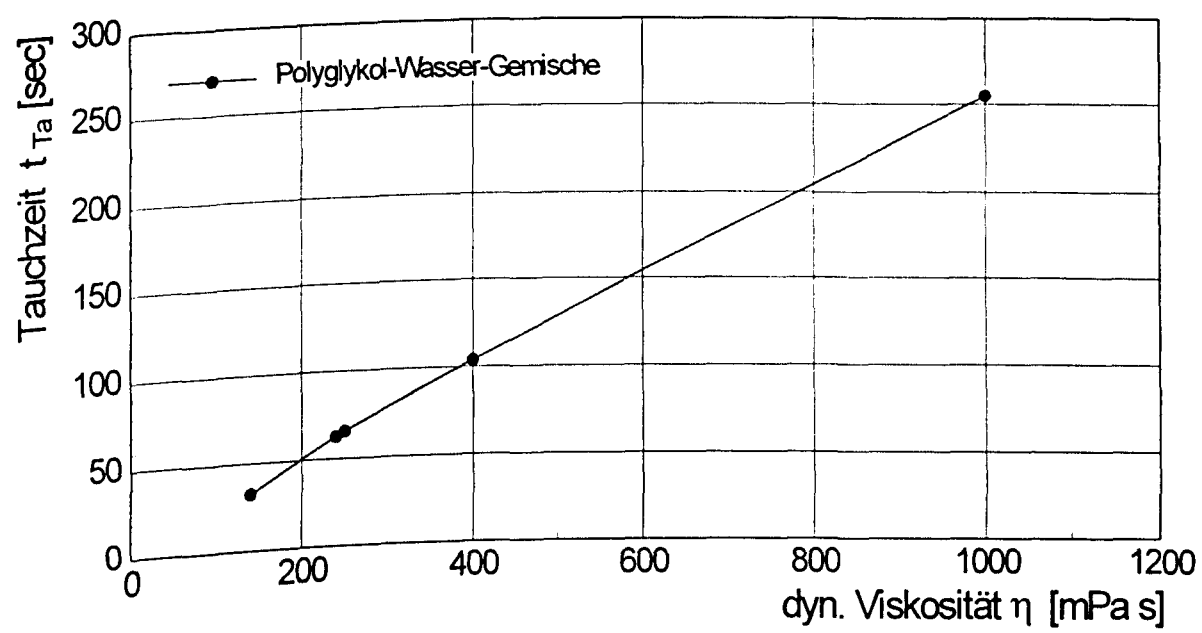


Bild 5.3: Zusammenhang zwischen dynamischer Viskosität und Tauchzeit bei Polyglykol-Wasser-Gemischen

Im Rahmen der Eignungsversuche wurden Tauch- und Trichterversuche mit Einpreßmörteln ausgeführt. Bild 5.4 zeigt den Zusammenhang zwischen Tauch- und Auslaufzeit für die Einpreßmörtel. Vergleichend ist der Zusammenhang zwischen Tauch- und Auslaufzeit bei Verwendung der Polyglykol-Wasser-Gemische angegeben.

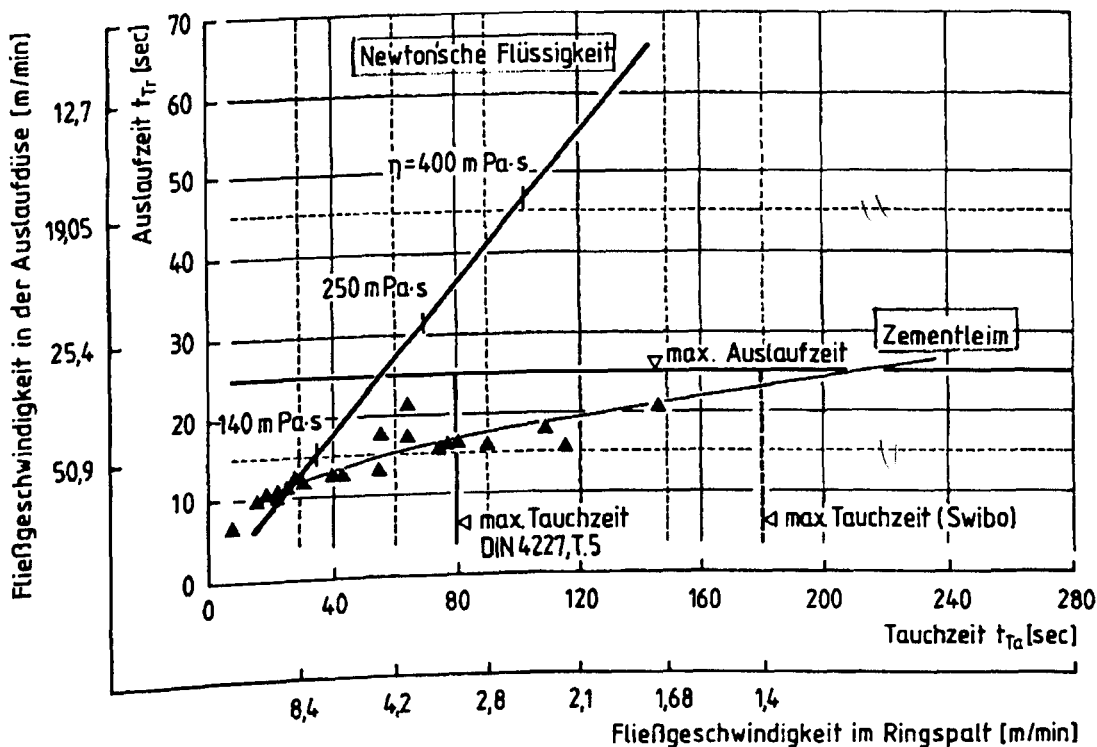


Bild 5.4: Zusammenhang zwischen Tauchzeit und Auslaufzeit (10 mm-Trichter) bei Zementleimen und bei Polyglykol-Wasser-Gemisch

Bild 5.4 zeigt, daß der Zusammenhang von Tauch- und Auslaufzeit vom untersuchten Medium abhängt. Bis zu einer Tauchzeit  $t_{Ta} = 30$  sec ist der Zusammenhang zwischen Tauch- und Auslaufzeit nahezu unabhängig vom untersuchten Medium. Bei Auslaufzeiten  $t_{Ta} > 30$  sec nimmt die Auslaufzeit bei Verwendung von Newton'schen Flüssigkeiten stärker zu als bei Einpreßmörtel. Die Auslaufzeiten sind bei Zementmörtel dadurch weniger gespreizt als bei Newton'schen Flüssigkeiten. Die unterschiedliche Fließfähigkeit von Zementmörtel wird durch die Tauchzeit besser differenziert als durch die Auslaufzeit.

Beim Vergleich der Tauchzeiten von Polyglykol-Wasser-Gemischen und Zementmörtel müssen die unterschiedlichen Flüssigkeitsdichten berücksichtigt werden (Polyglykol-Wasser-Gemisch  $\rho = 1,05 \text{ g/cm}^3$ , Zementmörtel  $\rho = 1,90 \text{ g/cm}^3$ ). Beim Zementmörtel wird aufgrund der größeren Dichte eine geringere Gewichtskraft wirksam. Dieses kann ein möglicher Grund für die größeren Tauchzeiten bei Verwendung von Zementmörtel sein.

Manns [63] geht davon aus, daß in die Tauchzeit sowohl die dynamische Viskosität  $\eta$  als auch die Fließgrenze  $\tau_f$  eingeht. Bei Beginn der Fallbewegung muß die Fließgrenze  $\tau_f$  überwunden werden. Fließt der Mörtel durch den Ringspalt, ist die Viskosität  $\eta$  maßgebend.



Dem Einfluß von Viskosität und Fließgrenze auf die Tauchzeit wurde im Rahmen der Versuche nicht gezielt nachgegangen. Dennoch sollen die Fließbedingungen im Tauchrohr und im Trichter nachfolgend eingehender betrachtet werden.

Das Tauchgerät stellt einen Rohrabschnitt mit einem Einbau, dem Tauchkolben, dar. Während des Tauchversuches sinkt der Tauchkolben  $\Delta h = 50 \text{ cm}$  tief. Dabei fließt ein Mörtelvolumen von  $V = 1,51 \text{ l}$  durch den Ringspalt zwischen Tauchrohr und Tauchkolben (Ringspaltfläche  $A_{\text{Spalt}} = 0,0359 \text{ dm}^2$ ). Die Fließgeschwindigkeit im Ringspalt läßt sich nach Gl. (5.1) berechnen.

$$v_{\text{Spalt}} = \frac{V}{A_{\text{Spalt}} \cdot t_{\text{Ta}}} = \frac{1,51 \text{ dm}^3}{0,0359 \text{ dm}^2 \cdot t_{\text{Ta}} \cdot 10} = \frac{4,206 \text{ m}}{t_{\text{Ta}} \text{ sec}} \quad (5.1)$$

mit  $t_{\text{Ta}}$  in sec.

Tab. 5.4 zeigt die Tauchzeiten und die nach Gl. (5.1) berechneten Fließgeschwindigkeiten im Ringspalt. Die Ergebnisse von Tab. 5.4 sind außerdem in Bild 5.4 aufgetragen.

Tab. 5.4: Tauchzeit und Fließgeschwindigkeit im Ringspalt

Tauchzeit $t_{\text{Ta}}$ [sec]	Fließgeschwindigkeit $v_{\text{Spalt}}$ [m/min]	Fließgeschwindigkeit $v_{\text{Spalt}}$ [m/s]
30	8,4	0,1402
60	4,2	0,0701
90	2,8	0,0467
120	2,1	0,0351
240	1,05	0,0175
300	0,84	0,0140

In Analogie wird die mittlere Fließgeschwindigkeit in der Auslaufdüse beim Trichterversuch (10 mm-Auslaufdüse, Fließquerschnitt  $A_{\text{Düse}} = 0,007854 \text{ dm}^2$ ) bestimmt:

$$v_{\text{Düse}} = \frac{V}{A_{\text{Düse}} \cdot t_{\text{Tr}}} = \frac{1,00 \text{ dm}^3}{0,007854 \text{ dm}^2 \cdot t_{\text{Tr}} \cdot 10} = \frac{12,732 \text{ m}}{t_{\text{Tr}} \text{ sec}} \quad (5.2)$$

mit  $t_{\text{Tr}}$  in sec.

Tab. 5.5 zeigt die Auslaufzeiten und die nach Gl. (5.2) berechneten Fließgeschwindigkeiten in der Düse. Die Ergebnisse von Tab. 5.5 sind außerdem in Bild 5.4 aufgetragen.

Tab. 5.5: Auslaufzeit und Fließgeschwindigkeit in der Auslaufdüse

Auslaufzeit 10 mm-Trichter $t_{Tr}$ [sec]	Fließgeschwindigkeit in der Auslaufdüse $v_{Düse}$ [m/min]	Fließgeschwindigkeit in der Auslaufdüse $v_{Düse}$ [m/s]
15	50,9	0,8483
30	25,4	0,4233
60	12,7	0,2117

Die Fließgeschwindigkeit in der Düse ist bei einer maximal zulässigen Auslaufzeit von  $t_{Tr} = 25$  sec weit größer als die Fließgeschwindigkeit im Spannglied. Die Fließgeschwindigkeit im Ringspalt des Tauchgerätes liegt demgegenüber im Bereich üblicher Fließgeschwindigkeiten beim Verpressen von Spanngliedern ( $3 \leq v \leq 15$  m/min). Die Übergangszone Mörtel/Rohrwand wird aufgrund der ähnlichen Fließgeschwindigkeiten im Spannglied und im Tauchversuch ähnlich sein. Die Übergangszone wird durch den Tauchversuch somit wirklichkeitsnäher abgebildet als mit dem Trichterversuch.

Da die Viskosität von Zementmörtel mit der Fließgeschwindigkeit abnimmt, wird die scheinbare Viskosität beim Trichterversuch kleiner sein als beim Tauchversuch und beim Verpressen von Spanngliedern. Der materialspezifische Fließwiderstand wird im Trichterversuch somit kleiner sein als beim Tauchversuch.

Wie noch gezeigt wird, ändert sich die scheinbare Viskosität von Zementmörtel bei Fließgeschwindigkeiten bis  $v = 0,1$  m/sec besonders stark. Beim 10 mm-Trichter treten jedoch mindestens Fließgeschwindigkeiten von  $v = 0,2$  m/sec auf. Beim Trichterversuch ist die scheinbare Viskosität deswegen insgesamt kleiner als im Tauchversuch. Deswegen nimmt die Auslaufzeit mit abnehmender Mörtelfließfähigkeit weniger zu als die Tauchzeit.

Bei Newton'schen Flüssigkeiten bestimmt nur die Viskosität über Tauch- und Auslaufzeiten. Der Zusammenhang zwischen Tauch- und Auslaufzeit ist deswegen ein anderer als bei Zementmörtel.

## 5.4 Erfahrungen mit den Prüfverfahren zu Volumenänderung und Wasserabsondern

### Dosen

Bei den Versuchen hat sich herausgestellt, daß das millimetergenaue Füllen der Dosen auch mit einer Meßbrücke schwierig ist. Die Schwierigkeiten nehmen bei dickflüssigen Mörteln zu. Für eine genaue Bestimmung der Volumenänderung ist deswegen eine Nullmessung nach dem Füllen unumgänglich. Die Messung mit der Tiefenlehre ist zeitaufwendig und erfordert beim noch flüssigen Mörtel große Sorgfalt.

Die Messung der Volumenänderung im Alter von 24 h mit der Tiefenlehre ist gut ausführbar, allerdings ebenso zeitaufwendig. Aufgrund der geringen Dosenhöhe (Mörtelspiegelhöhe ca.  $h = 100 \text{ mm}$ ) ist die Längenänderung  $\Delta l$  vergleichsweise gering. Hohe Sorgfalt ist deswegen bei allen Messungen unabdingbar.

Das Wasserabsondern kann mit der Dose nur durch Abgießen im Mörtelalter von  $t = 3 \text{ h}$  gemessen werden. Dieses wird nach DIN 4227, T. 5 jedoch nicht gefordert. Bei allen Versuchen wurde die Anforderung der DIN 4227, T. 5 eingehalten, wonach im Alter von  $t = 28 \text{ d}$  kein Wasser auf der Probe stehen darf.

Die Versuche belegen, daß das maximale Wasserabsondern im Alter von  $(t - t_0) = 3 - 4 \text{ h}$  nach dem Mischen auftritt. Das Wasserabsondern im Alter von  $t = 28 \text{ d}$  ist nicht maßgebend. Das Wasserabsondern sollte deswegen gemäß prEN 445 und 447 im Mörtelalter von  $t = 3 - 4 \text{ h}$  gemessen werden.

### Meßzylinder

Die Meßzylinder haben sich bei den Versuchen von der Handhabung her gut bewährt. Es ist vorteilhaft, daß die Veränderung von Mörtelspiegel und Absetzwasser bei durchsichtigen Gefäßen von außen angelesen werden kann. Bei durchsichtigen Meßzylindern mit einer Skala können Volumenänderung und Wasserabsondern direkt abgelesen werden.

Bei dem 100 ml-Standzylinder war die Volumenänderung nicht gut abzulesen. Das Verhältnis von Gesamtvolumen zu Skalierung ist für eine genaue Ablesung nicht hinreichend.

Mit dem 250 ml-Standzylinder war die Volumenänderung gut zu messen. Aufgrund der größeren Ausgangshöhe des Zylinder, bzw. der Mörtelsäule, ist die Längenänderung der Mörtelsäule  $\Delta l$  größer und kann mit einer höheren Genauigkeit abgelesen werden.

Die Ablesegenauigkeit war beim 1.000 ml-Zylinder aufgrund der nochmals größeren Mörtelsäule noch besser. Wegen des größeren Mörtelausgangsvolumens ist die abgesonderte Wassermenge größer und kann genauer gemessen werden.

### **1 m-Standrohr**

Bei dem durchsichtigen 1 m-Standrohr können Längenänderung  $\Delta l$  der Mörtelsäule und abgesonderte Wassermenge ähnlich gut abgelesen werden, wie beim 1.000 ml-Standzylinder. Entgegen der Erwartung wurde aufgrund der höheren Mörtelsäule kein verstärktes Wasserabsondern festgestellt.

## **5.5 Empfehlung zur Bestimmung von Fließfähigkeit, Volumenänderung und Wasserabsondern**

Aufgrund der Versuche können im Hinblick auf die europäischen Normen Empfehlungen zur Bestimmung der Fließfähigkeit gegeben werden:

- Die Auslaufzeit von 12,7 mm-Trichter und 10 mm-Trichter entsprechen sich im wesentlichen. Vorteile der Trichter sind die gute Handhabung und die schnelle Durchführbarkeit der Versuche. Die Trichterversuche sollten im Rahmen von Eignungs- und Güteprüfungen nur begleitend zum Tauchversuch ausgeführt werden.
- Der Marsh-Trichter mit der 4,76 mm-Auslaufdüse ist nur bei sehr dünnflüssigen Mörteln zu empfehlen bzw. möglich. Die entsprechenden Tauchzeiten liegen bei  $t_{Ta} < 30$  sec.
- Aufgrund des größeren Zeitbereiches differenziert der Tauchversuch die Fließfähigkeit des Mörtels besser als die Trichterversuche (10 mm und 12,7 mm-Auslaufdüse).
- Die Fließgeschwindigkeit im Ringspalt des Tauchgerätes entspricht üblichen Verpreßgeschwindigkeiten bei Spanngliedern. Die Fließgeschwindigkeit in der Düse des 10 mm-Trichters ist deutlich größer. Die Strömungsverhältnisse im Spannglied werden deswegen durch den Tauchversuch besser abgebildet als mit dem Trichterversuch. Dieses betrifft die Ausbildung der Übergangszone Mörtel/Rohrwand.

Für die Prüfung von Wasserabsondern und Volumenänderung können folgende Empfehlungen gegeben werden:

- Die Bestimmung von Volumenänderung und Wasserabsondern mit durchsichtigen Gefäßen (gemäß prEN 445 - 447) ist schneller und einfacher ausführbar als mit der Dose gemäß DIN 4227, T. 5. Die Zylinder wurden auf Baustellen probeweise eingesetzt. Die gute Handhabung wurde von den Ausführenden vor Ort bestätigt.
- Das Wassersondern ist 3 - 4 Stunden nach dem Mischen maximal. Dieses entspricht den Prüfanforderungen nach prEN 445 und 447.
- Die Bestimmung des Wasserabsonderns im Alter von  $t = 24$  h oder  $t = 28$  d gemäß DIN 4227, T. 5 ist wenig sinnvoll, da das Wasserabsondern zu diesem Zeitpunkt nicht maximal ist.
- Bei der Ablesung von Volumenänderung und Wasserabsondern 3 - 4 h nach dem Mischen erhält man das Ergebnis früher als nach dem derzeitigen Modus ( $t = 24$  h). Die Volumenänderung ist nach  $t = 3$  h und 24 h identisch.
- Die Größe des Meßzylinders ist nur bedingt proportional zur abgesonderten Wassermenge. Die Festlegung eines einheitlichen Ausgangsvolumens ist deswegen unbedingt zu empfehlen. Bei den Versuchen hat sich der Meßzylinder mit einem Ausgangsvolumen von  $V = 1.000$  ml als besonders günstig erwiesen. Bei diesem Zylinder konnte die abgesonderte Wassermenge aufgrund des großen Ausgangsvolumens durch Abgießen leicht gemessen werden.
- 1 m-Standrohre (transparente Rohre,  $d = 40$  mm) haben sich bei den Versuchen ebenfalls bewährt. Durch die außen angebrachte Millimeter-Skala konnten Volumenänderung und Wasserabsondern gut und genau abgelesen werden.

## 6 VERPRESSVERSUCHE

### 6.1 Ziel der Verpreßversuche

Die Verpreßbarkeit von Spanngliedern wird von der Fließeigenschaft des Mörtels, Fließgeschwindigkeit, Fließwiderstand, Rohrdurchmesser und Rohrlänge beeinflusst. Für jede Verpreßarbeit ist zu prüfen, ob das Spannglied unter den vorliegenden Randbedingungen mit dem zur Verfügung stehenden Material und Geräten zuverlässig verpreßt werden kann. Schließlich wird gefragt, wie die vollständige Verfüllung des Spannglieds nachgewiesen werden kann. Derzeit kann nur anhand des Mörtelaustritts an den Auslauföffnungen auf die Spanngliedverfüllung geschlossen werden.

Die Überprüfung der vollständigen Verfüllung bereitet Schwierigkeiten. Die derzeitigen zerstörungsfreien Meßverfahren zum Auffinden etwaiger Hohlräume (z.B. Radarverfahren) sind derzeit noch nicht hinreichend zuverlässig [66], [73].

Anhand der Verpreßversuche sollten

- die Strömungsverhältnisse in Rohr und Spannglied studiert werden,
- der Einfluß unterschiedlicher Mörtelkonsistenz auf die Verpreßbarkeit von Spanngliedern studiert werden, u.a. der Druckverlust in Abhängigkeit von Fließgeschwindigkeit und Mörtelkonsistenz,
- die Machbarkeit einer Volumenbilanz zur Qualitätssicherung unter Baustellenbedingungen geprüft werden,
- die Erhärtungsbedingungen im Rohr im Vergleich zu den Ergebnissen der Eignungsprüfungen untersucht werden und
- die mörtelspezifischen Fließparameter aus Messung von Druckverlust und Fließgeschwindigkeit bestimmt werden; kurz: Bestimmung der Viskosität durch wirklichkeitsnahe Strömungsversuche in Rohrleitungen.

Zur Klärung dieser Fragen wurden Verpreßversuche an Modellrohren ohne und an Hüllrohren mit Spannstählen durchgeführt.

### 6.2 Druck-Durchflußmesser

Zur Kontrolle des Verpreßvorgangs ist die Messung der Einpreßgeschwindigkeit (Fließgeschwindigkeit), des Einpreßdrucks und des Einpreßvolumens entscheidend. Die

Einpreßgeschwindigkeit wird i.d.R. mit der Pumpe eingestellt. Fließgeschwindigkeit und Einpreßdruck ergeben sich aus der Pumpenleistung (p-v-Diagramm) und dem zu überwindenden Widerstand der durchströmten Rohrleitung. Bei veränderlichem Druck kann die Fließgeschwindigkeit nur ungenau ermittelt werden. Der Einpreßdruck wird üblicherweise mit einem Manometer am Ausgang der Pumpe gemessen. Die Messung des eingepreßten Mörtelvolumens ist derzeit nicht üblich.

Mit einem Druck-Durchflußmesser können Fließgeschwindigkeit, Durchflußvolumen und Einpreßdruck gemessen werden. Bild 6.1 zeigt den Aufbau des für die Versuche gebauten Druck-Durchflußmessers (Foto in Anlage A-6.1). Der Druck-Durchflußmesser beinhaltet einen Drucksensor und einen magnetisch-induktiven Durchflußsensor.

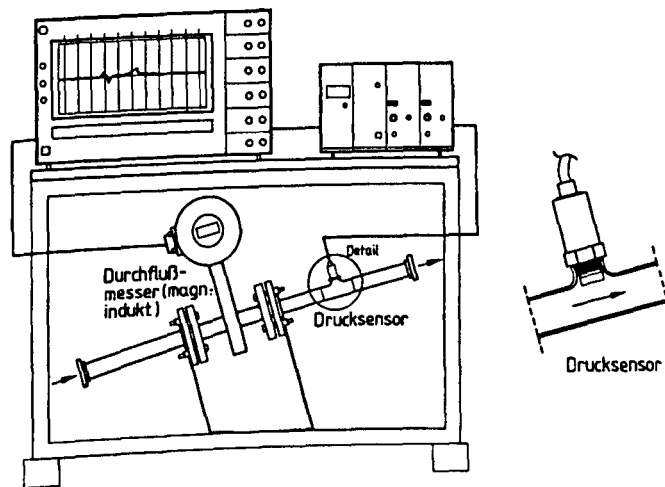


Bild 6.1: Druck- und Durchflußmesser

Der elektro-mechanische Drucksensor ist durch einen Sockel bündig im Rohrscheitel angebracht. Er wird über einen Verstärker mit einer Speisespannung versorgt. Das gemessene Drucksignal wird in ein elektrisches Signal gewandelt. Der magnetisch-induktive Durchflußmesser arbeitet nach dem Faradayschen Induktionsgesetz [9], [35], [57]. Er ist für elektrisch leitende Flüssigkeiten, wie Zementmörtel, geeignet. Das Meßprinzip beruht darauf, daß eine Spannung induziert wird, wenn ein elektrischer Leiter in einem Magnetfeld bewegt wird. Der elektrische Leiter ist hier das Fluid. Der Durchflußmesser beeinträchtigt die Strömung nicht. Mit dem verwendeten Durchflußmesser konnten sowohl die Fließgeschwindigkeit als auch das durchströmte Gesamtvolumen gemessen werden.

Neben magnetisch-induktiven Durchflußmessern werden auch Geräte angeboten, mit denen zusätzlich die Dichte der durchströmten Flüssigkeit bestimmt werden kann. Für die Messungen während der Verpreßarbeiten scheint die gleichzeitige Dichtemessung sinnvoll, da auf diese Weise das Mischungsverhältnis für jede Mischung indirekt überprüft werden

kann. Aus Kostengründen wurde ein solcher Durchflußmesser im Rahmen der Versuche nicht eingesetzt.

### 6.3 Verpreßversuche mit Modellrohren mit einem Hochpunkt

#### 6.3.1 Ziele der Verpreßversuche mit Modellrohren mit einem Hochpunkt

Anhand der Verpreßversuche mit Modellrohren sollten die Strömungsverhältnisse von Zementmörtel im Rohr studiert werden. Weiterhin sollten die materialspezifischen Mörtelparameter während und nach einem Fließvorgang in einem Rohr quantifiziert werden.

Die Verpreßversuche mit Modellrohren bilden die komplizierten Fließbedingungen im Spannglied realistischer als Eignungsversuche ab. Sie sind deshalb als Bindeglied zwischen den vergleichsweise einfachen Eignungsversuchen und den Strömungs- und Erhärtungsbedingungen im Spannglied zu betrachten. Bild 6.2 verdeutlicht den Zusammenhang schematisch.

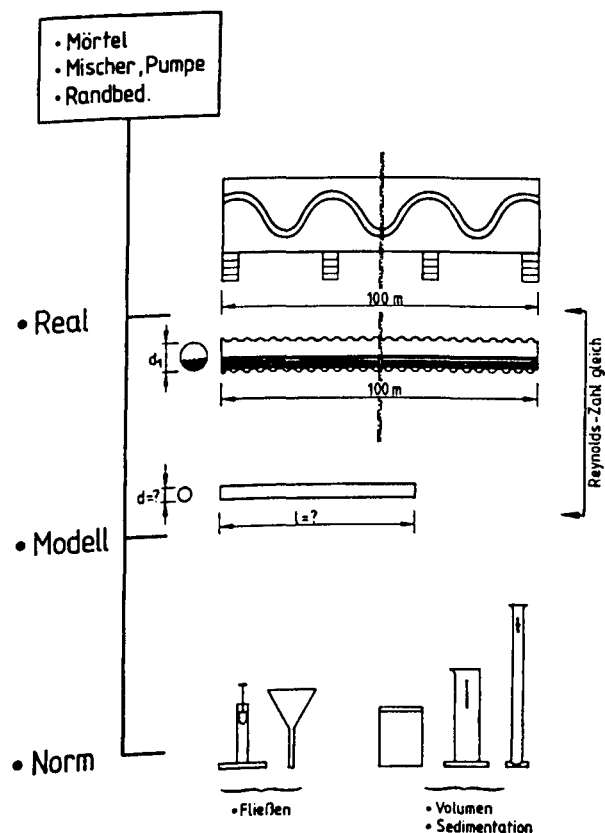


Bild 6.2: Modellversuche im Vergleich zu Eignungsversuchen und Bedingungen im Spannglied



Die Untersuchung von Strömungen im Modellmaßstab ist in der Strömungsmechanik üblich. Voraussetzung ist, daß strömungsmechanisch ähnliche Verhältnisse vorliegen. Beim Verpressen von Spanngliedern liegt bei üblichen Verpreßgeschwindigkeiten von 5 - 15 m/min eine laminare Strömung vor. Dieses erleichtert die Betrachtung der Strömungsmechanik. Auf die Grundlagen der Strömungsmechanik und die gültigen Randbedingungen beim Verpressen von Spanngliedern wird noch eingegangen.

### 6.3.2 Versuchsbeschreibung

Die zu verpressenden Rohre waren über einen Sattel mit einem Hochpunkt gelegt (Bild 6.3, Fotos in Anlage A-6.2). Damit sollte der Hochpunkt eines über mehrere Felder verlaufenden Spannglieds nachgebildet werden. Der Sattel hatte eine Länge von 15,0 m im Grundriß und eine Scheitelhöhe von 1,40 m. Die Rohre hatten eine Gesamtlänge von ca. 15,30 m.

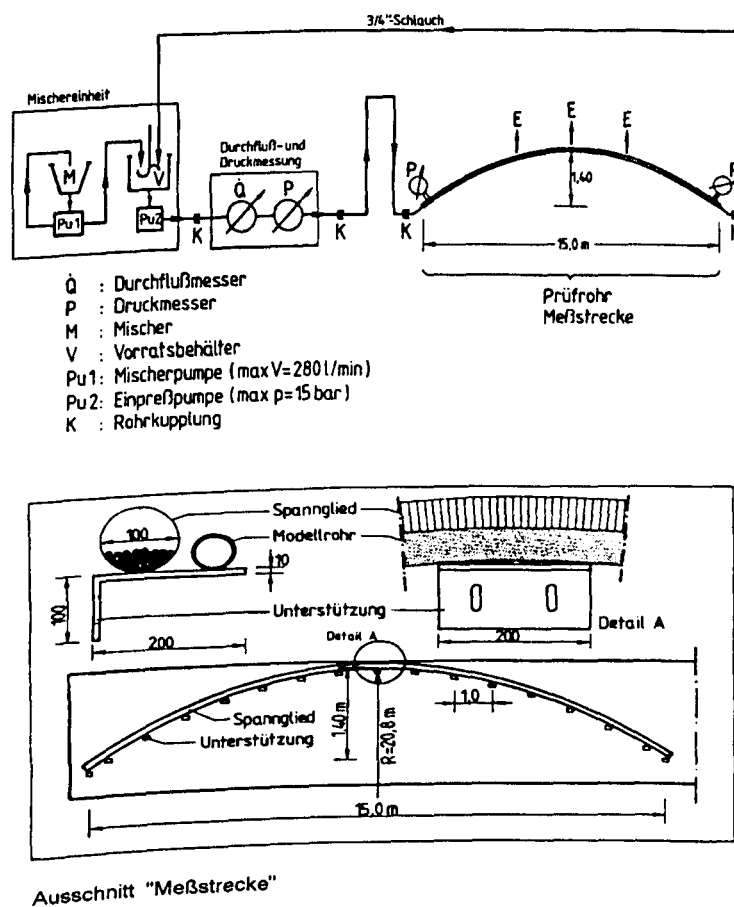


Bild 6.3: Versuchsaufbau der Verpreßversuche an Modellrohren mit Sattel

Die Rohre waren zur Vereinfachung der Strömungsbedingungen zunächst nicht mit Spannstahl gefüllt. Am Rohranfang und -ende waren im Rohrscheitel Sockel angeschweißt. In die Sockel waren Druckaufnehmer eingeschraubt. Die Rohrlänge zwischen den Druckaufnehmer betrug  $l = 15,0$  m. Als Rohrmaterialien wurden PVC-transparent-Rohr

In die Sockel waren Druckaufnehmer eingeschraubt. Die Rohrlänge zwischen den Druckaufnehmer betrug  $l = 15,0$  m. Als Rohrmaterialien wurden PVC-transparent-Rohr (Durchmesser  $d_a/d_i = 40/36$  mm,  $75/68,5$  mm), PE-Rohr ( $d_a/d_i = 23/20,4$  mm;  $32/26$  mm;  $50/40,8$  mm) und Stahlhüllrohr ( $d_a/d_i = 67/60$  mm) verwendet. Zwischen Mischer und Einfüllöffnung des Rohres war der Druck-Durchflußmesser angeordnet.

Die Rohre wurden vom linken Tiefpunkt her verpreßt. Am Hochpunkt sowie jeweils  $1,5$  m links und rechts vom Hochpunkt waren Entlüftungen angeordnet. An der Auslauföffnung (rechts) war ein Schlauch am Rohr angeschlossen. Durch diesen Schlauch wurde der Mörtel zum Vorratsbehälter zurückgepumpt. Der Mörtel konnte so mehrfach für die Strömungsmessung verwendet werden. Auf diese Weise konnte eine größere Spanngliedlänge nachgebildet werden.

Die Mörtelkonsistenz wurde durch Verwendung verschiedener Zemente oder durch Einsatz von Fließmittel eingestellt. Alle Mörtel wurde mit einem W/Z-Wert von  $W/Z = 0,38$  und Zugabe von  $1,0\%$  Einpreßhilfe (EH 1) in einem Kolloidalmischer hergestellt. Vor dem Einpressen in das Modellrohr wurde die Fließfähigkeit der Mörtel mit Tauch- und Trichterversuch bestimmt. Tab. 6.1 gibt einen Überblick über die Verpreßversuche am Sattel.

Die Verpreßgeschwindigkeit wurde in Abhängigkeit des Rohrdurchmessers zwischen  $5$  und  $8$  m/min eingestellt. Die Entlüftungen am Hochpunkt sowie links und rechts davon wurden geschlossen, sobald der Mörtel die jeweilige Stelle passiert hatte. Die Strömungsverhältnisse im steigenden und fallenden Rohrabschnitt wurden beim Füllen des Rohres durch Fotos dokumentiert.

Nachdem das Rohr zwischen den Drucksensoren vollständig mit Mörtel gefüllt war, wurde die Fließgeschwindigkeit variiert und der Druck am Rohranfang und -ende gemessen. Daraus ergab sich der Druckverlust im Rohrabschnitt in Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit. Die Variation der Fließgeschwindigkeit war nach längstens  $10$  Minuten abgeschlossen, so daß sich die Mörtel Eigenschaften durch Ansteifen nicht wesentlich änderte.

Tab. 6.1: Überblick über die Verpreßversuche an Modellrohren mit Sattel

Versuch	Datum	Datei	Zement	FM	Rohrart	Tauchzeit $t_{Ta}$ (sec)	$\eta'$ (mPa s)	Trichterzeit $t_{Tr}$ (sec)	Tauchzeit $t_{Ta}$ (30) (sec)	Trichterzeit $t_{Tr}$ (30) (sec)
V 0	23.08.94	-	Z 1	-	t 40/36	78,0		10,6	-	-
V 1	01.09.94	Hy 1	Z 2	-	t 40/36	41,7	800	14,4	-	-
V 2	"	Hy 2	Z 4	0,3	t 40/36	118,3	2.500	19,3	-	-
V 3	13.09.94	Hy 3	Z 7	nicht homog.	t 40/36	76,9	3.400	16,0	-	-
V 4	13.09.94	Hy 4	Z 3	-	t 40/36	55,5	1.900	17,5	-	-
V 5	14.09.94	Hy 5	Z 8	0,8	t 40/36	102,0	5.000	14,3	-	-
V 6	14.09.94	Hy 6	Z 11	-	t 40/36	109,1	5.200	17,9	-	-
V 7	14.09.94	Hy 7	Z 1	-	t 40/36	20,3	600	10,1	-	-
V 8	21.09.94	Hy 8	Z 4	0,5	PE 32/26	69,3	2.000	12,6	236,0	30,4
V 9	05.10.94	Hy 9	Z 10	-	PE 32/26	22,4	800	10,8	96,1	20,3
V 10	05.10.94	Hy 10	Z 12	-	PE 32/26	80,3	2.600	16,5	244,3	35,8
V 11	05.10.94	Hy 11	Z 12	0,5	PE 32/26	23,0	700	12,0	64,9	14,9
V 12	06.10.94	Hy 12	Z 9	-	PE 32/26	63,7	1.700	21,3	94,3	24,1
V 13	06.10.94	Hy 13	Z 9	0,5	PE 32/26	28,1	600	13,4	80,5	18,5
V 14*	28.10.94	Hy141	Z 1	-	t 75/67,5					
V-P 1	16.06.95	P 42	Polyglykol + Wasser		PE 25/20,4	66,0	220			
V-P 2	03.08.95	P 42			PE 25/20,4	45,3	260			

t 40/36: PVC-transparent-Rohr  $d_i/d_a = 40/36$  mm

t 75/67,5: PVC-transparent-Rohr  $d_i/d_a = 75/67,5$  mm

PE 40/36: PE-Rohr  $d_i/d_a = 32/26$  mm

PE 25/20,4: PE-Rohr  $d_i/d_a = 25/20,4$  mm

V-P: Verpreßversuche mit Polyglykol-Wasser-Gemisch

\* Versuch V 14: 10 Litzen mit  $A_p = 100 \text{ mm}^2$  im Rohr eingelegt, nicht vorgespannt

6.3.3 Verpreßversuche mit Newton'scher Flüssigkeit

Zum Kalibrieren des Meßaufbaus und zur Überprüfung Meßergebnisse auf die Gesetze der Strömungsmechanik wurden Verpreßversuche mit zwei Newton'schen Flüssigkeiten ausgeführt. Es galt zu prüfen, ob die Materialparameter der Flüssigkeit, wie Schubspannung und Viskosität, anhand der Meßergebnisse bei einer Rohrströmung bestimmt werden können. Schließlich sollten durch Verpreßversuche an Modellrohren die materialspezifischen Parameter für Zementmörtel unter wirklichkeitsnahen Fließbedingungen ermittelt werden.

Als Newton'sche Flüssigkeiten wurden Polyglykol-Wasser-Gemische ( $\gamma \approx 1,05 \text{ g/cm}^3$ ) wie bei den Kalibrierversuchen von Tauchgerät und Trichter verwendet. Die Viskosität der Gemische konnte durch die Polyglykol-Konzentration gezielt eingestellt werden. Bei einer Polyglykol-Konzentration zwischen 30 und 50 M.% lag die Viskosität bei  $T = 20 \text{ °C}$  zwischen  $100 \leq \eta \leq 1.000 \text{ mPa s}$ . Die Zuordnung von Polyglykol-Konzentration, Viskosität, Tauch- und Trichterzeit ist in Tab. 6.3 dargestellt.

Es wurden zwei Verpreßversuche mit Polyglykol-Wasser-Gemischen ausgeführt. Die Versuche sind in Tab. 6.1 mit V-P bezeichnet. Vor dem Verpreßversuch ( $T = 20 \text{ °C}$ ) wurde jeweils die Tauchzeit des Gemisches bestimmt. Die dynamische Viskosität wurde außerdem mit einem Rotationsviskosimeter gemessen. Die Ergebnisse von Tauchversuchen und Viskosimetermessungen sind in Tab 6.1 ebenso angegeben.

## 6.4 Verpreßversuche an Spanngliedern

### 6.4.1 Ziel der Verpreßversuche an Spanngliedern

Im Rahmen der Versuche wurden auch Spannglieder verpreßt. Die Spannglieder waren in Bauwerken oder in einem Verpreßstand verlegt. Bei den Verpreßversuchen an Bauwerken wurden Spannglieder in Brückenneubauten oder im Rahmen von Sanierungsmaßnahmen an alten Brücken verpreßt. Bei den Verpreßversuchen an Bauwerken konnte der Verpreßerfolg nach dem Erhärten nicht untersucht werden konnte, weil derzeit keine geeigneten zerstörungsfreien Prüfverfahren existieren. Bei den Versuchen im Verpreßstand wurde das Spannglied nach dem Erhärten zur Bewertung des Verpreßerfolgs zerschnitten.

Die Versuche an Spanngliedern wurden mit folgenden Zielen durchgeführt:

- Vergleich und Beurteilung von Gerätetechnik, Prüfverfahren und Arbeitsweisen im Hinblick auf das vollständige und sichere Verpressen von Spanngliedern,
- Einsatz neuer Gerätetechnik zur Dokumentation und Überwachung der Verpreßarbeit,
- Aufstellung einer Volumenbilanz,
- Bereitstellung von Verfahren zur Abschätzung der Verpreßbarkeit langer Spannglieder in Abhängigkeit von Mörtleigenschaften, Einpreßdruck und Einpreßgeschwindigkeit,
- Entwicklung von Kriterien und Maßnahmen zur Qualitätssicherung.

Die Versuchs- und Meßaufbauten der jeweiligen Versuche werden nachfolgend beschrieben.

### 6.4.2 Messungen während der Verpreßarbeit an Brückenneubauten

Beim Verpressen wurden der Einpreßdruck und die Einpreßgeschwindigkeit (Fließgeschwindigkeit) gemessen. Die Spannglieder waren in Brückenneubauten verlegt und waren vor dem Verpressen mit der zulässigen Vorspannkraft vorgespannt. Bild 6.4 zeigt den Spanngliedverlauf (Längs- und Querspannglieder) bei den Brückenneubauten M, W und B schematisch.

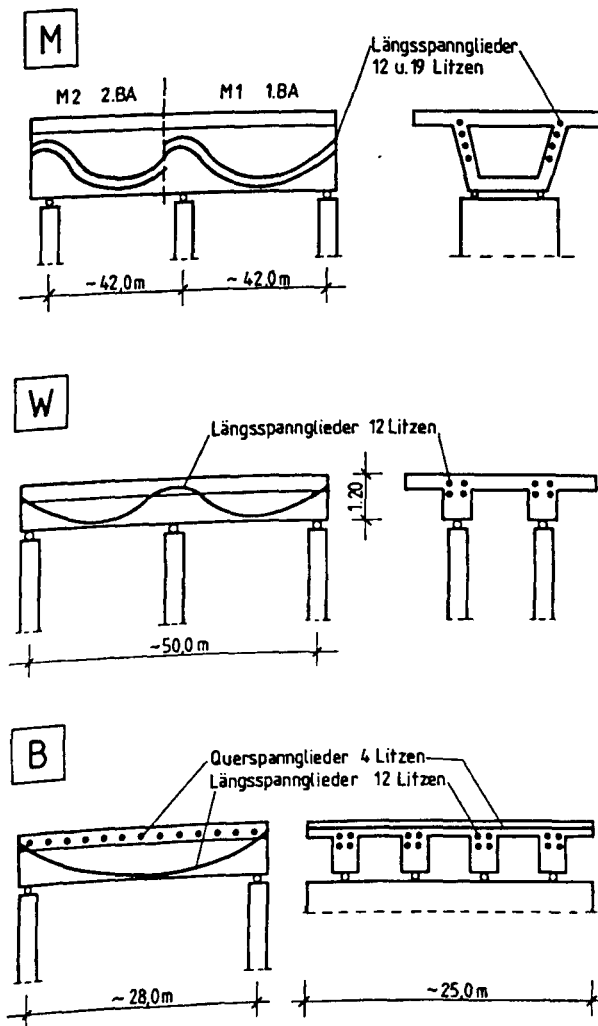


Bild 6.4: Spanngliedverlauf bei den Verpreßversuchen auf Baustellen

Bei den Spanngliedern handelte es sich um Litzenstrahlspannglieder mit 4, 12 und 19 Litzen ( $A_p = 140 \text{ mm}^2$ ). Die Hüllrohrdurchmesser waren gemäß bauaufsichtlicher Zulassung auf die Litzenzahl abgestimmt. Die Spanngliedlänge variierte zwischen  $l = 23,0 \text{ m}$  (Spanngliedtyp 6-4) und  $l = 80,51 \text{ m}$  (Typ 6-12). Einen Überblick über die verpreßten Spannglieder gibt Tab 6.2.

Tab. 6.2: Spanngliedtypen bei Verpreßversuchen auf Baustellen

Bauwerk	Litzen	Hüllrohr Ø (mm)	äquival. Ø (mm)	Länge (m)	A <sub>h</sub> (mm <sup>2</sup> )	A <sub>p</sub> (mm <sup>2</sup> )	A <sub>Fl</sub> A <sub>h</sub> - A <sub>p</sub> (mm <sup>2</sup> )	Füllungs- grad A <sub>p</sub> /A <sub>Hü</sub>
M 1	12	80/87	83,0	43,75	5.411	1.680	3.731	0,310
	19	90/97	93,0	43,65	6.793	2.660	4.133	0,391
	"	"	"	43,75	"	"	"	"
M 2	12	80/87	83,0	60,84	5.411	1.680	3.731	0,310
	19	90/97	93,0	45,41	6.793	2.660	4.133	0,391
M 3	12	80/87	83,0	60,81	5.411	1.680	3.731	0,310
	12	"	"	80,51	"	"	"	"
	19	90/97	93,0	45,41	6.793	2.660	4.133	0,391
W	12	75/82	77,4	50,50	4.705	1.680	3.025	0,357
B	4	45/52	47,5	23,0	1.772	560	1.212	0,316
	12	75/82	77,4	27,05	4.705	1.680	3.025	0,357

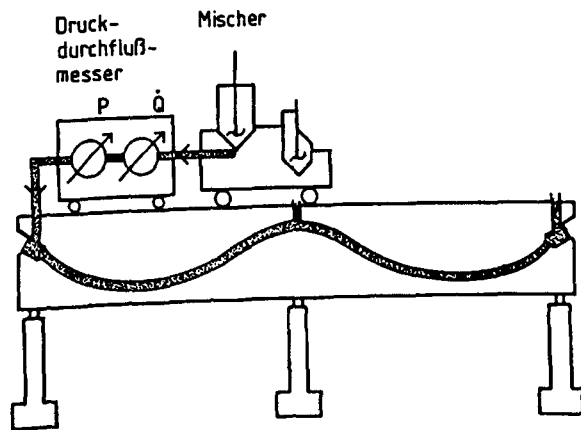
Die Mörtelrezeptur ist jeweils von der ausführenden Firma festgelegt worden. Der Mörtel wurde gemäß DIN 4227, T. 5 hergestellt. Auf der Baustelle M wurde ein hochtourig arbeitender Mischer verwendet. Bei den Bauwerken W und B wurde der Mörtel mit einem Kolloidalmischer hergestellt.

Die Mörtel Eigenschaften wurden gemäß DIN 4227, T. 5 geprüft. Bei den Bauwerken M und W wurden Wasserabsondern und Volumenänderung mit einem 1.000 ml Meßzylinder gemessen. Tab. 7.1 (s. Kap. 7) zeigt die Ergebnisse der Eignungsprüfungen sowie die verwendeten Zemente und Mörtelrezepturen.

Die für die Verpreßarbeiten verwendeten Zemente stammten zwar von den gleichen Herstellern wie jene für die Eignungsversuche im Labor und die Verpreßversuche mit Modellrohren, aber aus unterschiedlichen Herstellchargen. Die Zemente für die Verpreßarbeiten an Bauwerken waren bis zu einem Jahr nach jenen für die Laborversuche hergestellt worden. Die Zemente für die Verpreßarbeiten an Brücken wurden chemisch nicht analysiert. Ein Zusammenhang zwischen den chemischen Analysen und den Mörtel Eigenschaften der Baustellenversuche ist deswegen nur bedingt möglich.

Ziel der Baustellenversuche war zu klären, welcher Zusammenhang zwischen Frischmörtel Eigenschaften (speziell der Fließeigenschaft), Einpreßdruck und Einpreßgeschwindigkeit (Fließgeschwindigkeit im Spannglied) besteht.

Die Anordnung von Mischer, Druck-Durchflußmesser und Einfüllöffnung der Spannglieder zeigt Bild 6.5 schematisch. Der Druck-Durchflußmesser war zwischen Mischer und Einfüllöffnung des Spannglieds angeordnet.



Schemabild

Bild 6.5: Meßanordnung beim Verpressen von Spanngliedern in Brücken

Die Spannglieder wurden von einer Seite ohne Unterbrechung verpreßt. Bei den Spanngliedern, die über zwei Felder mit einem Hochpunkt verliefen, wurden die Hochpunktentlüftungen mit einem Schieber verschlossen, sobald dort Mörtel austrat. Die der Einfüllöffnung gegenüberliegende Auslauföffnung blieb solange geöffnet, bis der Mörtel dort austrat. Der ausfließende Mörtel wurde mit einem Eimer aufgefangen bis keine Luftblasen mehr auftraten. An den Auslauföffnungen wurden je Spannglied  $V_{\text{Eimer}} = 1,5 - 10 \text{ l}$  Mörtel aufgefangen. Zur Bestimmung des eingepreßten Volumens  $V_{\text{Spannglied}}$  mußte das aufgefangene Volumen  $V_{\text{Eimer}}$  von dem durch den Durchflußmesser geflossenen Volumen  $V_{\text{Durchflußmesser}}$  abgezogen werden. Die Volumenbilanz ist im Bild 6.6 schematisch dargestellt.

$$V_{\text{Spannglied}} = V_{\text{Durchflußmesser}} - V_{\text{Eimer}} \quad (6.1)$$

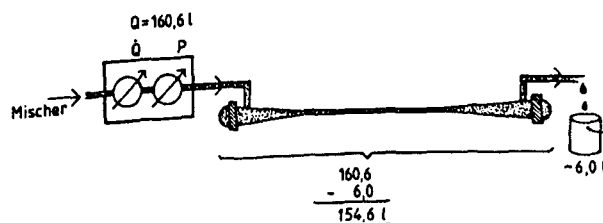


Bild 6.6: Volumenbilanz beim Verpressen von Spanngliedern

Einpreßdruck und Fließgeschwindigkeit wurden während der Verpreßvorgänge kontinuierlich gemessen und mit Datalogger, PC und Mehrkanallinienschreiber registriert.

### 6.4.3 Verpreßversuch mit einem Draht-Spannverfahren in einem Verpreßstand

#### 6.4.3.1 Versuchsaufbau

Im Rahmen des Versuches wurde ein ca. 30 m langes Spannglied in einem Versuchsstand verpreßt. Das Spannglied bestand aus 42 Drähten  $\varnothing 7$  mm und war bereichsweise vorgespannt.

Gemäß allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung ist bei diesen Spanngliedern eine Innenwendel anzuordnen, um einen Fließquerschnitt im Zentrum des Spannglieds zu erzeugen. Im Vorfeld des Versuches war man der Ansicht, daß die Innenwendel an Umlenkpunkten nach erfolgter Vorspannung flachgedrückt ist. Durch den Versuch sollte geklärt werden, ob das Spannglied auch ohne Innenwendel zuverlässig verpreßt werden kann.

Im vorgespannten Abschnitt war das Spannglied in einem Stahlbetontrog verlegt, der die Vorspannkraft aufnahm. In diesem Bereich war ein Sattel mit einem Hoch- und einem Tiefpunkt ausgebildet. Der Hochpunkt lag 2,70 m über dem Boden, Bild 6.7, Foto in Anlage A-6.3. Zwischen Hoch- und Tiefpunkt war das Spannglied mit einer Kraft von  $F = 50$  kN vorgespannt, so daß die Drähte am Hüllrohr anlagen.

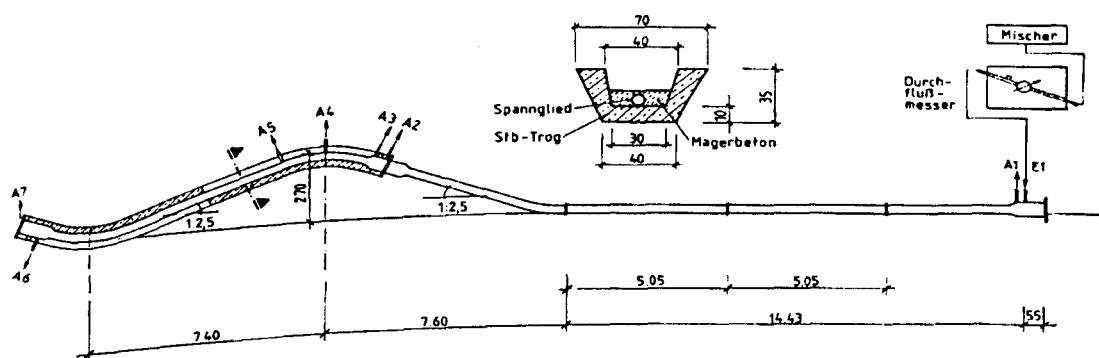


Bild 6.7: Verpreßversuch mit einem bereichsweise vorgespannten Spannglied

Um eine größere Fließlänge zu erhalten, wurde an den vorgespannten Abschnitt ein nicht vorgespannter ca. 20 m langer Spanngliedabschnitt mit einer festen Kopplung angekoppelt.



Der nicht vorgespannte Abschnitt wurde mit der gleichen Steigung (1 : 2,5) wie der vorgespannte Abschnitt bis zum Boden geführt. Von dort an lag der nicht vorgespannte Spanngliedabschnitt bis zur Einpreßstelle auf dem ebenen Boden.

Bei der realen festen Kopplung des Spannverfahrens werden die beiden Koppelbüchsen mit einer innenliegenden Koppelspindel verbunden. Die Abschnitte beiderseits der Kopplung werden als getrennte Abschnitte verpreßt. Bei dem Versuchsspannglied wurde anstatt der Koppelspindel eine Überwurfmutter verwendet, so daß des Zentrumsloch für den Mörtelfluß frei blieb. Das Spannglied konnte so über die gesamte Länge verpreßt werden.

Das Spannglied (Hüllrohr:  $d_i / d_a = 72 / 79$  mm) war in dem trogförmigen Stahlbetonelementen in gemagerten Mörtel eingebettet, um eine bauwerksähnliche Abdichtung zu erreichen. Der Koppelanker lag in einer üblichen Koppelflasche. Diese war zur Abdichtung ebenfalls mit Mörtel umgeben. Der nicht vorgespannte Abschnitt des Spannglieds war mit einem PE-Rohr ummantelt. Der Raum zwischen Hüllrohr und PE-Rohr war vor dem Verpreßversuch mit Mörtel verfüllt worden. Am Ende des nicht vorgespannten Spannglieds waren die Drähte mit einer üblichen Ankerkörper verankert. An beiden Spanngliedenden waren Verpreßhauben auf den Ankerplatten aufgeschraubt.

#### 6.4.3.2 Öffnungen

Am Ende des nicht vorgespannten Spanngliedendes lag die Einpreßstelle E1, von der das Spannglied verpreßt wurde. Etwa 30 cm links von der Einpreßstelle war die erste Entlüftung (Auslauföffnung A1) angeordnet, siehe Bild 6.7. Die rechte Flasche des Koppelankers hatte keine Entlüftung. Die linke Flasche des Koppelankers war über ihre Länge durch zwei Auslauföffnungen (A2 und A3) entlüftet. Am Hochpunkt sowie 1,52 m links vom Hochpunkt waren weitere Auslauföffnungen (A4 und A5) angeordnet. Links vom Tiefpunkt lag die Auslauföffnung A6. Am linken Spannanker war die Auslauföffnung A7 angeordnet.

Die Auslauföffnungen waren mit Stahlstandrohren versehen. An die Stahlrohre waren über zwischengeschaltete Absperrschieber und Bajonettverschlüsse baustellenübliche PE-Einpreßrohre angeschlossen. Die Anschlüsse waren so ausgebildet, daß von ihnen nachverpreßt werden konnte.

## 7 ERGEBNISSE DER VERPRESSVERSUCHE

### 7.1 Überblick

Die Ergebnisse der Verpreßversuche umfassen:

- Ergebnisse der Verpreßversuche mit Modellrohren,
- Ergebnisse von Verpreßversuchen an Spanngliedern in Brücken,
- Ergebnisse eines Verpreßversuches mit einem Draht-Spannverfahren,
- Ergebnisse von Verpreßversuchen im Rahmen einer Spanngliedsanierung,
- Ergebnisse eines Verpreßversuches mit Mikrozement.

### 7.2 Ergebnisse der Verpreßversuche mit Modellrohren

#### 7.2.1 Zur Ausbildung der Mörtelfront

Die Mörtelformt wurde bei den Verpreßversuchen mit Modellrohren am Sattel studiert, vergl. Bild 6.3. Gesehen vom Einpreßstutzen fließt der Mörtel bergauf unabhängig von der Konsistenz in einer Druckleitung, vergl. Bild 6.3. Das Rohr wurde kontinuierlich von unten nach oben gefüllt. Bei dünnflüssigen Mörteln ( $t_{Ta} \approx 30 \text{ sec}$ ) stellte sich ein nahezu

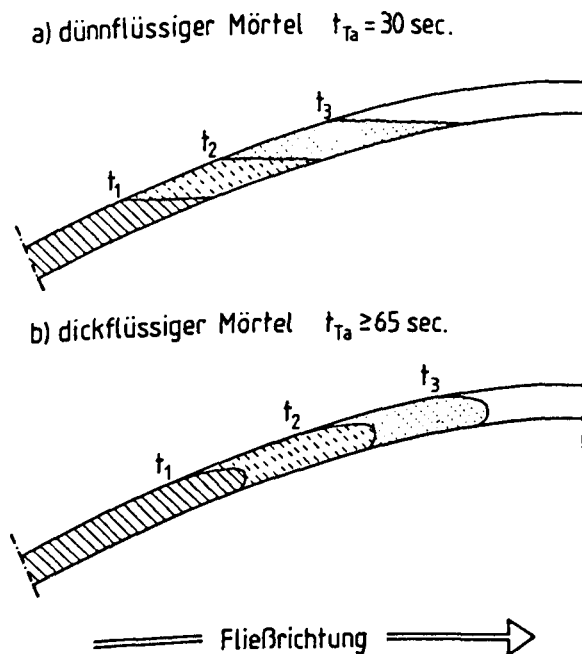


Bild 7.1: Strömungsbedingungen im ansteigenden Rohr (Fließrichtung: bergauf) in Abhängigkeit der Mörtelkonsistenz

waagerechter Mörtelspiegel ein. Bei dickflüssigen Mörteln eilte der Mörtel im Innern des Fließquerschnitts geringfügig voraus, Bild 7.1.

Nach dem Überschreiten des Hochpunktes, also beim bergab strömen, zeigten sich deutliche Unterschiede, s. Bild 7.2. Die Spitze der Mörtelzunge ist zu unterschiedlichen Zeitpunkten durch  $t_1$ ,  $t_2$  und  $t_3$  gekennzeichnet.

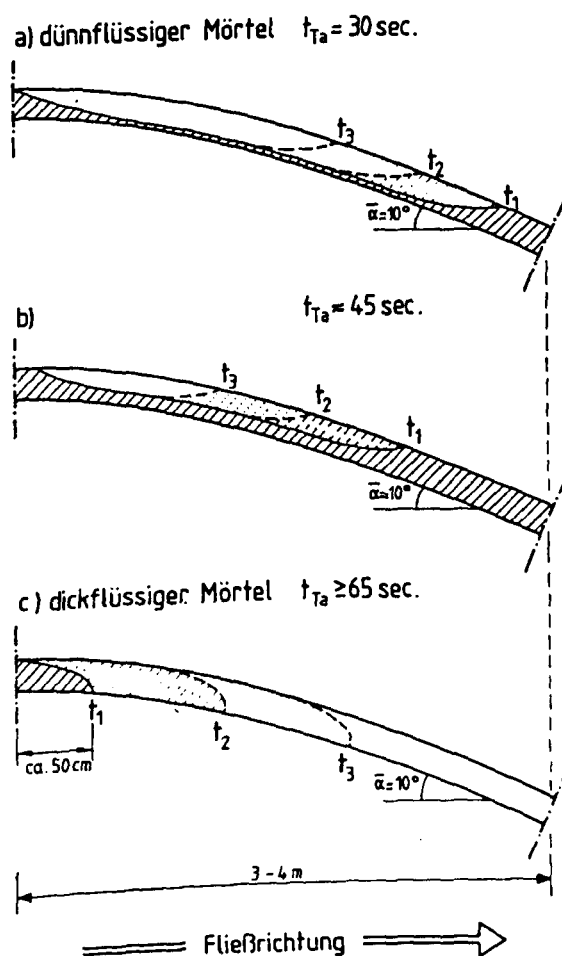


Bild 7.2: Strömungsbedingungen im abfallenden Rohr (Fließrichtung: bergab) in Abhängigkeit der Mörtelkonsistenz

Dünnflüssiger Mörtel fließt bergab in einer Freispiegelleitung, nachdem er den Hochpunkt passiert hatte (Bild 7.2a). Der Rohrabschnitt rechts vom Hochpunkt wurde anschließend von unten nach oben gefüllt. Die Luft konnte durch die Entlüftung am Hochpunkt und links vom Hochpunkt entweichen. Bei diesen Mörteln war das vollständige Füllen des abfallenden Rohrabschnitts von unten nach oben unproblematisch.

Mit zunehmender Mörtelsteifigkeit stellte sich der Mörtelspiegel im fallenden Rohrabschnitt nicht mehr horizontal ein (Bild 7.2b). Statt dessen bildete sich eine langgestreckte Mörtelzunge, die das Rohr sowohl von oben nach unten als auch von unten nach oben füllte.

Die eingeschlossene Luft konnte durch die Entlüftung links vom Hochpunkt nicht mehr vollständig entweichen. Die Entlüftung wurde vom Mörtel vorzeitig verschlossen. Es blieb ein kleiner luftgefüllter Hohlraum zurück. Die Luft konnte erst durch die Entlüftungen entweichen, nachdem in umgekehrter Richtung, d.h. von der Auslauföffnung, gegengepreßt wurde.

Bei dickflüssigen Mörteln ( $t_{Ta} > 65$  sec) bildete sich an der Verpreßfront eine Mörtelzunge aus (Bild 7.2c). Diese hatte eine Pfropfenwirkung und sorgte für einen kurzen Übergang von unverpreßten zum verpreßten Rohrabschnitt. Aufgrund der Pfropfenbildung an der Mörtelspitze wurde im Rohr keine Luft eingeschlossen. Das Rohr wurde von der Einpreßöffnung (links) bis zur Auslauföffnung (rechts) kontinuierlich gefüllt. Der Mörtel floß bergab in einer Druckleitung. Die Länge der Mörtelzunge hing von der Mörtelkonsistenz ab. Je dickflüssiger der Mörtel war, desto kürzer war die Mörtelzunge. Bei einer Tauchzeit von  $t_{Ta} = 65$  sec war die Mörtelzunge ca. 50 cm lang.

### 7.2.2 Ergebnisse der Verpreßversuche mit Newton'scher Flüssigkeit

Für die Kalibrierung der Meßeinrichtung (Druck- und Durchflußmessung) wurden Strömungsversuche am Sattel (vergl. Bild 7.3) mit zwei Newton'schen Flüssigkeiten ausgeführt. Deren Tauchzeiten und Viskositäten sind in Tab. 7.1 angegeben. Die Viskosität wurde mit einem Rotationsviskosimeter bestimmt.

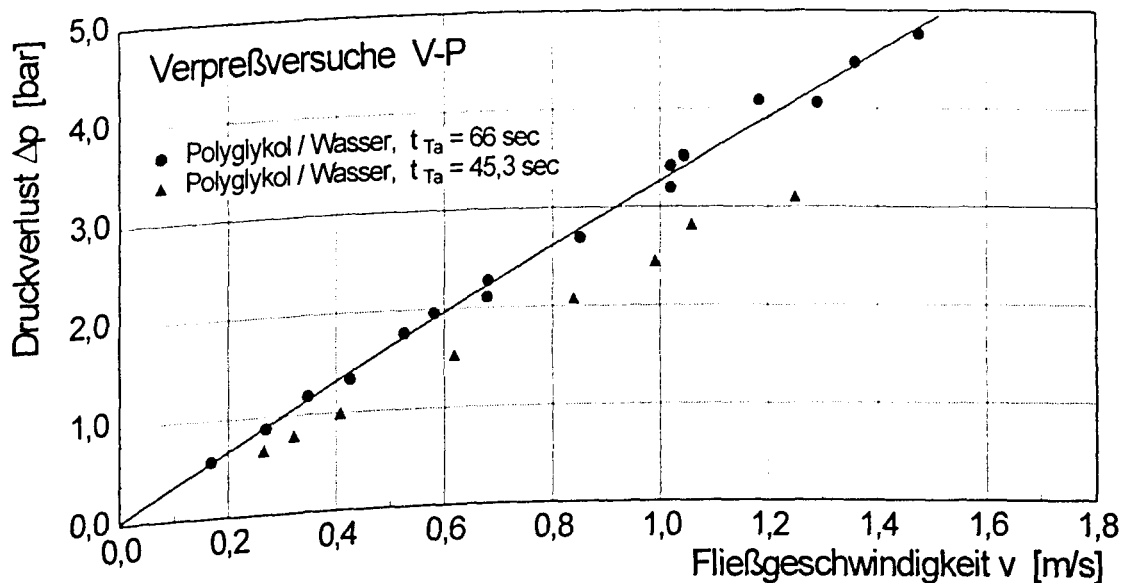


Bild 7.3: Druckverlust in Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit für die Newton'schen Flüssigkeiten

Bild 7.3 zeigt den gemessenen Druckverlust über einen Rohrabschnitt ( $l = 15$  m,  $d_i = 20,4$  mm) in Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit. Zwischen Fließgeschwindigkeit und

Druckverlust besteht ein linearer Zusammenhang. Wie für eine Newton'sche Flüssigkeit zu erwarten, verläuft die Gerade durch den Ursprung.

### 7.2.3 Ergebnisse der Verpreßversuche mit Zementmörtel

Bild 7.4 zeigt exemplarisch die Ergebnisse der Verpreßversuche V 10 und V 11. Die Mörtel wurden mit dem Zement Z 12 hergestellt. Bei Versuch V 11 wurde dem Mörtel zusätzlich Fließmittel zugegeben. Bei Zugabe von Fließmittel war die Tauchzeit mit  $t_{Ta} = 23,0$  sec deutlich kleiner als ohne Fließmittel ( $t_{Ta} = 80,3$  sec).

In dem Bild ist jeweils der Druckverlust in Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit im Rohr ( $l = 15$  m,  $d_i = 20,4$  mm) dargestellt, nachdem das Rohr vollständig mit Mörtel gefüllt war. Mörtelrezepturen und Tauchzeiten nach dem Mischen sind im Bild 7.4 angegeben.

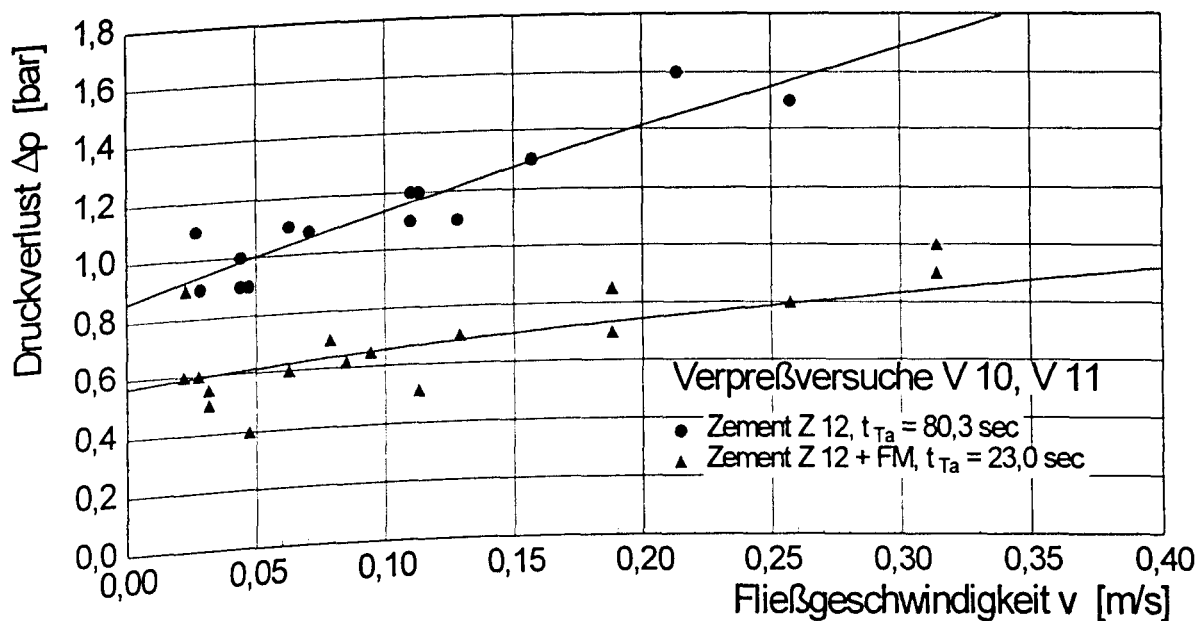


Bild 7.4: Druckverlust in Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit für Zementmörtel

Auch bei Verwendung von Zementmörtel besteht zwischen Fließgeschwindigkeit und Druckverlust ein linearer Zusammenhang. Die Gerade verläuft jedoch nicht durch den Ursprung. Zementmörtel stellt also eine Nicht-Newton'sche Flüssigkeit, sondern eine Bingham'sche Flüssigkeit dar. Das bedeutet, daß zunächst eine Anfangsenergie notwendig ist, um den Mörtel in Bewegung zu bringen. Bei einer Newton'schen Flüssigkeit steigt der Druckverlust demgegenüber proportional zur Fließgeschwindigkeit an.

Wird der Druckverlust extrapoliert, ergibt sich für  $v = 0$  m/s ein Druckverlust von  $\Delta p = 0,9$  bar (ohne FM), bzw.  $\Delta p = 0,5$  bar (mit FM). Diese Werte entsprechen einem erforderlichen

Anfangsdruck, um den Zementmörtel in Bewegung zu setzen. Der Anfangsdruck ergibt sich aus der Anfangsschubspannung einer Bingham-Flüssigkeit [63]. Die geringere Tauchzeit des Mörtel bei Versuch V 11 führte zu einem insgesamt geringeren Druckverlust bei gleicher Fließgeschwindigkeit im Rohr. Die Meßergebnisse der übrigen Verpreßversuche mit Modellrohren enthält Anlage A-7.1.

#### 7.2.4 Wasserabsondern und Volumenänderung

Bei einigen Versuchen wurde der zeitliche Verlauf der Wasserabsonderung an einem transparenten PVC-Rohr oder einem Stahlhüllrohr verfolgt. Beim PVC-Rohr konnte das Wasserabsondern direkt beobachtet werden. Das Stahlhüllrohr wurde nach dem Erhärten zur Inspektion teilweise abgewickelt.

Bei den Versuchen mit PVC-Rohren trat in den ersten Stunden nach dem Verpressen deutliches Wasserabsondern auf. Das Wasserabsondern war i.d.R. ca. 4 h nach dem Verpressen abgeschlossen. Das Wasser sammelte sich im Rohrscheitel des Sattels sowie an spezifischen Hochpunkten, wo es nicht entweichen konnte (z.B. an Verengungen oder vor Verbindungsstücken der PVC-Rohre). Aber 24 h nach dem Verpressen war das angesammelte Wasser wieder vollständig verschwunden, vom Mörtel aufgesogen. Im Rohr blieb ein entsprechender Hohlraum zurück.

Die Stahlhüllrohre wurden nach dem Erhärten ( $t > 3$  d) zur Inspektion teilweise abgewickelt. Das Wasser hatte sich offenbar ebenso am Hochpunkt, im Hüllrohrscheitel und in den Hüllrohrsicken gesammelt. Zum Zeitpunkt der Inspektion war das Wasser jedoch schon wieder vollständig vom Mörtel aufgenommen, so daß ein Hohlraum zurückblieb. Die Breite des Hohlraums am Rohrscheitel war im Vergleich zu unprofilierten PVC-transparent-Rohren schmaler, aber zugleich länger. Dieses ist darauf zurückzuführen, daß sich das Wasser beim Stahlhüllrohr in den Hüllrohrsicken sammeln konnte.

Die Hohlraumbildung durch abgesondertes Wasser zeigt Bild 7.5 schematisch. Zunächst wird ein definiertes Volumen, z.B. das Hüllrohr, vollständig mit Mörtel gefüllt ( $t = 0$  h). In den ersten Stunden nach dem Verpressen kommt es zum Wasserabsondern. Enthält die Einpreßhilfe ein Quellmittel, tritt gleichzeitig eine Volumenzunahme auf (bis ca.  $t = 4$  h). Die Volumenzunahme führt im Spannglied dazu, daß Mörtel an entspannten Oberflächen, z.B. an Ein- und Auslauföffnungen, austritt. Der durch das Wasserabsondern verursachte Hohlraum kann durch die Quellwirkung der Einpreßhilfe nicht geschlossen werden, da wie in Kap. 5 bereits ausgeführt, Volumenänderung und Wasserabsondern etwa zeitgleich ablaufen.

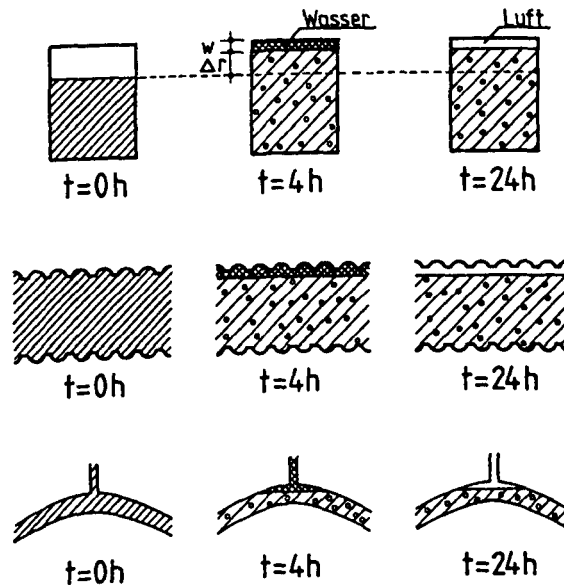


Bild 7.5: Hohlraumbildung während der Erhärtung, schematisch

Jefferis [24] empfiehlt die Bestimmung des Absetzmaßes eines Mörtels nach  $t = 24 h$ , anstatt der Messung von Wasserabsondern und Volumenänderung. Durch diese Versuche wurde jedoch gezeigt, daß Hohlräume im Spannglied infolge Wasserabsondern auch dann entstehen, wenn der Mörtel quellfähig ist, also kein Absetzen auftritt.

#### 7.2.4.1 Folgerungen zur Volumenänderung und zum Wasserabsondern

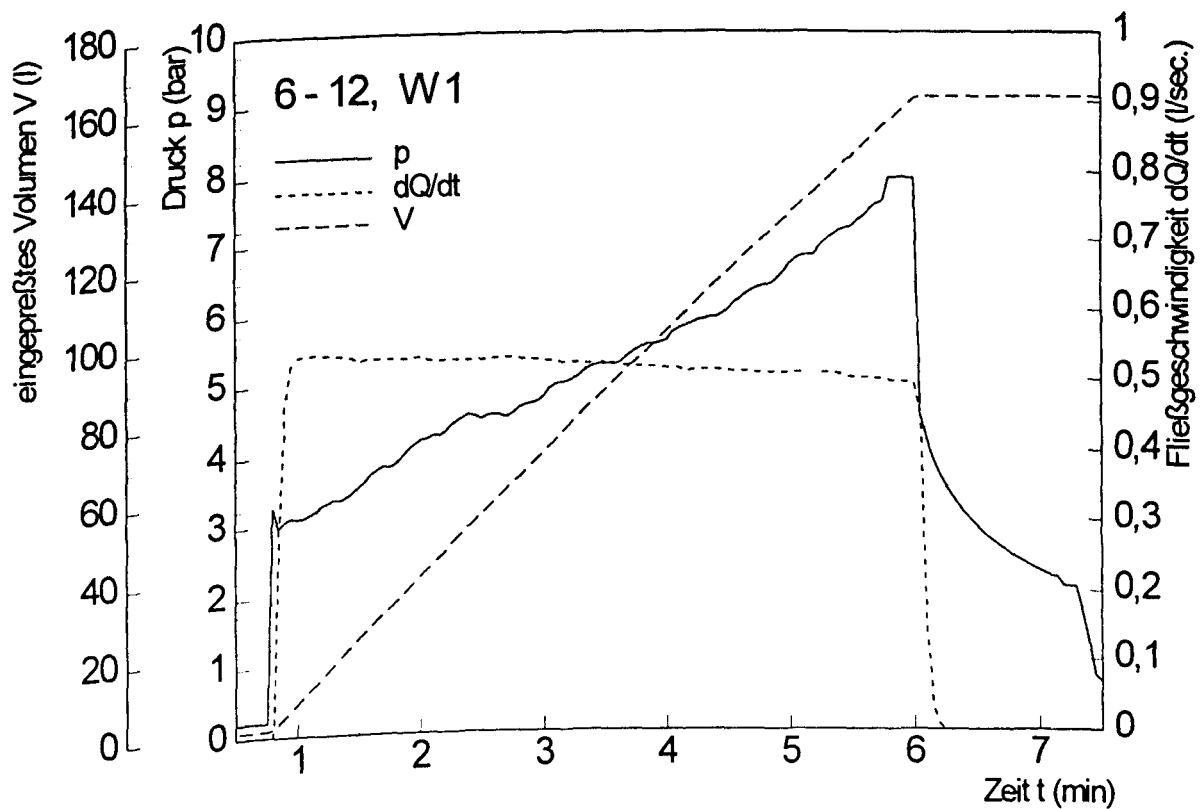
Die Verpreßversuche belegen, daß sich das abgesonderte Wasser an spezifischen Hochpunkten (Spanngliedhochpunkte, obere Punkte von Ankertrompeten o.ä.) sammelt und Hohlräume verursacht.

an diesen Stellen sollten deswegen zusätzliche Öffnungen angeordnet werden. Durch diese Öffnungen können Hochpunkte und Aufweitungen gezielt nachverpreßt werden. Außerdem kann sich abgesondertes Wasser in den zugehörigen Entlüftungsrohren sammeln. Etwaige Hohlräume entstehen dann nicht im Hüllrohr, sondern im Entlüftungsrohr, vergl. Kap. 2 sowie [33], [34]. Volumenänderung und Wasserabsondern sollten in Eignungsversuchen, wie in Kap. 5.2 ausgeführt,  $t = 3 - 4 h$  nach dem Mischen gemessen werden.

### 7.3 Ergebnisse der Verpreßversuche von Spannglieder in Brücken

#### 7.3.1 Druck, Volumen und Fließgeschwindigkeit

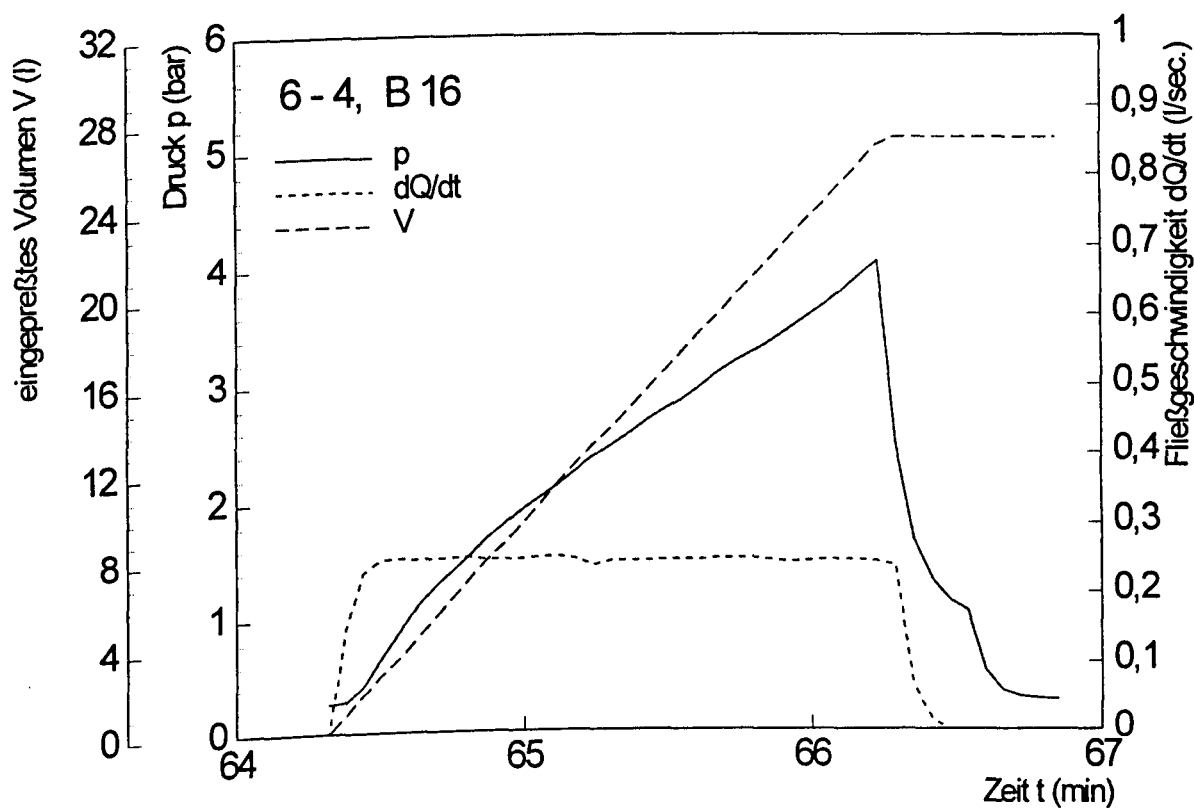
Während der Verpreßvorgänge wurden Druck und Einpreßgeschwindigkeit kontinuierlich gemessen. Die Ergebnisse von zwei Verpreßversuchen sind in den Bildern 7.6 und 7.7 exemplarisch dargestellt. Die durchgezogene Linie stellt jeweils den Druckanstieg dar. Die kurz gestrichelte Linie gibt die Durchflußgeschwindigkeit an. Die lang gestrichelte Linie zeigt das Durchflußvolumen gemessen am Durchflußmesser als Summenkurve.



Bilder 7.6: Einpreßdruck, -geschwindigkeit und Durchflußvolumen am Durchflußmesser während des Verpressens eines Litzenspannglieds mit 12 Litzen

Die Fließgeschwindigkeit während des Verpressens wurde überwiegend konstant eingestellt. Der Einpreßdruck stieg mit der verfüllten Spanngliedlänge infolge innerer Reibung im Hüllrohr an. Bei einigen Spanngliedern kam es mit zunehmender Verpreßlänge und zunehmendem Druck zum Abfall der Fließgeschwindigkeit. Dieses ist auf eine konstante Pumpenleistung zurückzuführen.





Bilder 7.7: Einpreßdruck, -geschwindigkeit und Durchflußvolumen am Durchflußmesser während des Verpressens eines Litzenpannglieds mit 4 Litzen

Tab. 7.1 zeigt die Rezepturen der verwendeten Einpreßmörtel. Weiterhin sind die Ergebnisse der Eignungsprüfungen angegeben. Die Kenntnis der Tauchzeiten ist für den Zusammenhang zwischen Mörtelfließfähigkeit, Druckverlust und Fließgeschwindigkeit wichtig. Anhand der Verpreßversuche sollte u.a. der Einfluß der Tauchzeit auf Einpreßdruck und Fließgeschwindigkeit untersucht werden.

Tab. 7.1: Mörtel Eigenschaften bei Verpreßversuchen auf Baustellen

Baustelle	Zement	EH	W/Z	Tauchzeit $t_{Ta}$ (sec)			$\Delta V$ (%)	$\Delta V_w$ (%)
				0 min	30 min	nach Durchf.		
		(%)						
M 1	Z 4	1,0	0,43	53,8	83,5	-	+ 1,89	1,05
M 2	Z 4	1,0	0,433	78,5	-	-	-	-
M 3	Z 4	1,0	0,426	30,0	48,3	29,0	+ 3,66	1,04
S	Z 1	0,5	0,34	66,4	112,0	-	0,0	0,73
W	Z 1	0,5	0,39	71,0	145,0	72,0	+ 2,08	0,22
B	Z 9	0,5	0,38	91,0	134,0	112,0	k.A.	k.A.

Die Meßergebnisse der übrigen Druck-Durchflußmessungen sind in den Anlagen A-7.2 - A-7.6 zusammengestellt.

### 7.3.2 Volumenbilanz

Das Sollvolumen wurde rechnerisch aus der Nettofließfläche je lfm Spannglied berechnet. Aufweitungen der Ankertrumpeten und die Volumina der Verpreßhauben konnten für die Bestimmung der Sollvolumina nicht berücksichtigt werden, da Angaben hierzu fehlten.

Das Durchflußvolumen wurde mit dem magnetisch-induktiven Durchflußmesser von Verpreßbeginn bis zum Verpreßende je Spannglied gemessen. An den Auslauföffnungen wurde der Mörtel mit Eimern aufgefangen. Das Volumen wurde anhand der Skala im Eimer abgelesen. Bei den Arbeiten an der Brücke W wurden am Spanngliedende stets etwa 6,0 l Mörtel aufgefangen. An der Brücke B wurden bei den Spanngliedern 6-12 ca. 1,5 l Mörtel und bei den Spanngliedern 6-4 ca. 0,5 l Mörtel im Eimer aufgefangen.

Das in die Spannglieder eingepreßte Mörtelvolumen ergibt sich aus der Differenz von Durchflußvolumen am Durchflußmesser und dem im Eimer aufgefangenen Volumen. Der Meßfehler des magnetisch-induktiven Durchflußmessers wurde in Kalibrierversuchen überprüft. Bei einem Durchflußvolumen von 100,0 l Flüssigkeit war der Meßfehler mit  $< 1,0 \%$  vernachlässigbar gering.

Die größte Unsicherheit bei der Volumenbilanz resultiert aus der vergleichsweise ungenauen Volumenmessung am Auslaufende. Um den Bauablauf nicht zu stören, wurde das aufgefangene Volumen im Eimer nur an der im Eimer angebrachten Skala abgelesen. Für eine exakte Volumenbilanz ist das jedoch zu ungenau.

Die Tabellen zeigen, daß bei jeweils identischen Spanngliedern (Typ und Länge) an den Bauwerken B und W fast gleiche Mörtelvolumina eingepreßt wurden. Da an der Auslauföffnung etwa das gleiche Mörtelvolumen aufgefangen wurde, schwankt auch das am Durchflußmesser abgelesene Volumen nur geringfügig.

Beim Bauwerk M variierte das mit Eimern aufgefangene Volumen mehr. Entsprechend schwankten auch die am Durchflußmesser abgelesenen Volumina stärker. Die Spanngliedtypen 6-12 waren an den Verankerungen teilweise undicht. Dadurch traten beim Verpressen teilweise Probleme auf. Die Volumenmessung konnte dann nicht ungestört vorgenommen werden. Dieses war u.a. bei den Spanngliedern 8N und 9N des 2. Bauabschnitts der Fall. Beim Spannglied 9N wurde der Verpreßvorgang kurz unterbrochen. Nach der Unterbrechung wurden keine Meßdaten mehr aufgenommen. Somit war das am

Durchflußmesser abgelesene Durchflußvolumen mit  $V = 178,0 \text{ l}$  kleiner als das Sollvolumen. Tatsächlich wurde das Spannglied solange verpreßt, bis Mörtel an den Auslauföffnungen ankam.

Das eingepreßte Volumen war in den übrigen Fällen stets größer als das berechnete Sollvolumen. Es muß allerdings beachtet werden, daß die Volumina von Aufweitungen und Verpreßhauben bei der Bestimmung des Sollvolumens wie bereits erwähnt nicht berücksichtigt werden konnten.

Die gute Übereinstimmung vom eingepreßten Mörtelvolumen bei identischen Spanngliedern deutet darauf hin, daß bei den hier verpreßten Spanngliedern keine gravierenden Unregelmäßigkeiten aufgetreten waren. Es kann weitgehend ausgeschlossen werden, daß Mörtel unkontrolliert vom Spannglied in den Bauwerksbeton gelangt war oder umgekehrt, daß größere nicht verfüllte Spanngliedabschnitte vorlagen.

Für eine exaktere Volumenbilanz müßte das zu verpressende Sollvolumen vor dem Verpreßvorgang mit dem Vakuum-Verfahren gemessen werden. Dann wären das Gesamtvolumen einschließlich Aufweitungen, Verpreßhauben und Entlüftungsröhrchen erfaßt.

### 7.3.3 Druckverlust

In den Tabellen ist darüber hinaus der Druck bei Verpreßbeginn und -ende für die jeweiligen Spannglieder zusammengestellt. Aus der Druckdifferenz ergibt sich der Druckverlust infolge innerer Reibung im Spannglied. Der Druckverlust hängt neben dem Spanngliedtyp von der Fließfähigkeit des Mörtels und der Fließgeschwindigkeit ab. Der Druckverlust betrug bei den Spanngliedern 6-12 während der Verpreßarbeiten an der Brücke W i.M.  $\Delta p = 0,0986 \text{ bar/m}$ . Bei den Arbeiten an der Brücke B ergab sich bei den Spanngliedern 6-12 ein mittlerer Druckverlust von  $\Delta p = 0,115 \text{ bar/m}$ . Bei den Spanngliedern 6-4 betrug der Druckverlust i.M.  $\Delta p = 0,168 \text{ bar/m}$ . Bei den Spanngliedern 6-19 am Bauwerk M betrug der mittlere Druckverlust beim 1. BA  $\Delta p = 0,036 \text{ bar/m}$ , beim 2. BA  $\Delta p = 0,067 \text{ bar/m}$ .

Der größere Druckverlust bei den kleinen Spanngliedtypen ist auf die größere innere Oberfläche der Spannglieder zurückzuführen. Mit der inneren Oberfläche steigt der Reibungswiderstand an. Auf den Zusammenhang von innerer Oberfläche und Druckverlust je lfm wird noch eingegangen.

Bei den Spanngliedtypen 6-12 wurde bei der Brücke B ein größerer Druckverlust registriert als bei der Brücke W. Dieses hängt mit der Fließfähigkeit des Mörtels zusammen. Die

Tauchzeit nach dem Mischen betrug auf der Baustelle W  $t_{Ta} = 71$  sec, auf der Baustelle B  $t_{Ta} = 91$  sec. Der Zusammenhang von Mörtelfließfähigkeit und Druckverlust wird auch bei den Ergebnissen der Baustelle M deutlich. Beim 1. BA wurde eine Tauchzeit von  $t_{Ta} = 53,8$  sec, beim 2. BA  $t_{Ta} = 78,5$  sec gemessen. Entsprechend war der Druckverlust bei höherer Tauchzeit größer. Es ist jedoch zu berücksichtigen, daß die Einpreßgeschwindigkeit beim 2. BA doppelt so groß war wie beim 1. BA. Eine Vergrößerung der Einpreßgeschwindigkeit hat ebenfalls eine Druckzunahme zur Folge. Wie jedoch die Versuche an den Modellrohren gezeigt haben, steigt der Druckverlust bei zunehmender Fließgeschwindigkeit unterproportional an. Am Bauwerk M stieg der Druckverlust bei den Spanngliedern 6-19 jedoch annähernd proportional von  $\Delta p = 0,036$  bar/m (1. BA) auf  $\Delta p = 0,067$  bar/m (2. BA) an. Dieses belegt, daß sich hier die Verdopplung der Einpreßgeschwindigkeit und die Vergrößerung der Tauchzeit gemeinsam auf den Druckverlust auswirken.

Zusammenfassend ist festzustellen, daß eine schlechte Mörtelfließfähigkeit und entsprechend großer Tauchzeit eine größere Energie für den Mörteltransport erfordert. Der höhere Energiebedarf bei baugleichen Spanngliedern und etwa gleicher Fließgeschwindigkeit spiegelt sich in einem höheren Druckverlust je lfm wieder.

#### 7.3.4 Weitere Erfahrungen und Empfehlungen für die Verpreßvorgänge

Die Durchgängigkeit der Spannglieder bei den Bauwerken B und W wurde vor dem Verpressen mit Druckluft geprüft. Alle Spannglieder waren durchgängig. Bei dem Bauwerk W hatte sich Wasser im Spannglied gesammelt. Dieses konnte mit der Druckluft nicht vollständig ausgetrieben werden. Das Wasser wurde erst vom Einpreßmörtel verdrängt. Es wurde vor der Mörtelzunge vorweggetrieben und trat an der Auslauföffnung vor dem Einpreßmörtel aus.

Unter Berücksichtigung der Erfahrungen aus den Verpreßversuchen mit den durchsichtigen Modellrohren scheint es günstiger, wenn die Mörtelkonsistenz so steif ist, daß sich auch bei einer Fließbewegung bergab eine Mörtelzunge mit einem Pfropfen an der Mörtelfront bildet. Im Spannglied befindliches Restwasser wird dann direkt und kontrolliert vor der Mörtelfront zum Ausgang transportiert. So ist weitgehend ausgeschlossen, daß Wasser oder Luft vom Mörtel eingeschlossen wird und einen Hohlraum verursacht. Bei einem steifen Mörtel ist außerdem der Bereich, in dem es an der Mörtelfront zur Vermischung kommen kann, kleiner. Der Einpreßmörtel bleibt dadurch homogener.

Wird die "optimale" Mörtelkonsistenz unter diesem Aspekt festgelegt, wäre eine Tauchzeit von  $40 \leq t_{Ta} \leq 75$  sec nach dem Mischen anzustreben. Dieses gilt für die Mörtelherstellung

mit einem Kolloidalmischer. Bei einer derart hohen Tauchzeit nach dem Mischen ist es allerdings schwierig, einen Mörtel herzustellen, bzw. einen Zement zu finden, bei dem die Tauchzeit 30 Minuten nach dem Mischen kleiner ist als  $t_{Ta} = 80 \text{ sec}$  (Anforderung nach DIN 4227 und pr EN 445 und pr EN 447). Die Verpreßversuche haben jedoch gezeigt, daß Spannglieder auch mit Mörteln dieser Tauchzeit sicher und zuverlässig verpreßt werden konnten.

7.4      **Ergebnisse des Verpreßversuchs mit einem Draht-Spannverfahren**

7.4.1    **Ergebnisse während des Verpreßvorgangs**

Der Verpreßversuch wurde an einem Spannglied mit 42 Drähen  $\varnothing 7 \text{ mm}$  ausgeführt. Der für das Verpressen erforderliche Mörtel wurde gemäß DIN 4227, T. 5 mit einem Kolloidalmischer hergestellt. Es wurde Zement Z 1 verwendet. Der W/Z-Wert betrug  $W/Z = 0,34$  mit 0,5 % EH 1. Insgesamt wurden drei Chargen mit jeweils 100 kg Zement angemischt. Die Ergebnisse der Eignungsprüfung sind in Tab. 7.2 angegeben.

Tab. 7.2:      Ergebnisse der Eignungsprüfung für den Mörtel beim Verpreßversuch im Verpreßstand

Mörtel	Mörtel-temp. T (°C)	Tauchzeit $t_{Ta}$ (sec)		Volumenänderung $\Delta V$ (%)		Wasserabsondern $\Delta V_w$ (%)		$\beta_{D28}$ (N/mm <sup>2</sup> )	Absetzen (%)
		0 min	30 min	1000 ml	250 ml	1000 ml	250 ml		
Zement 1 w/z=0,34 0,5 % EH	18,5	66,4	112,0	0,0	0,0	0,73	0,83	77,3 83,3 79,2	-0,2 -0,3 -0,2

Das Spannglied sollte mit einer Einpreßgeschwindigkeit von etwa 5 m/min (entsprechend  $\dot{Q} = 0,233 \text{ l/sec}$ ) verpreßt werden. Die angestrebte Einpreßgeschwindigkeit wurde an Einpreßpumpe eingestellt, im dem vor dem eigentlichen Verpreßvorgang etwas Mörtel durch den magnetisch-induktiven Durchflußmesser gepumpt wurde.

Der Verpreßvorgang begann 20 Minuten nach Mörtelherstellung. Der Mörtel wurde von der Einfüllöffnung E1 eingepreßt. Während des Verpreßvorgangs wurde zwischen der Pumpe des Swibo-Mischers und der Einpreßöffnung E1 die Fließgeschwindigkeit und der Druck D 1 kontinuierlich gemessen und aufgezeichnet. Mit weiteren Druckaufnehmern D 2, D 3 und D 4 wurde über die Spanngliedlänge der hydrostatische Druck an der Hüllrohrwand gemessen. Bei diesen Druckaufnehmern wurde ein Druck erst dann registriert, wenn der Mörtel an der jeweiligen Stelle angekommen war, Bild 7.8

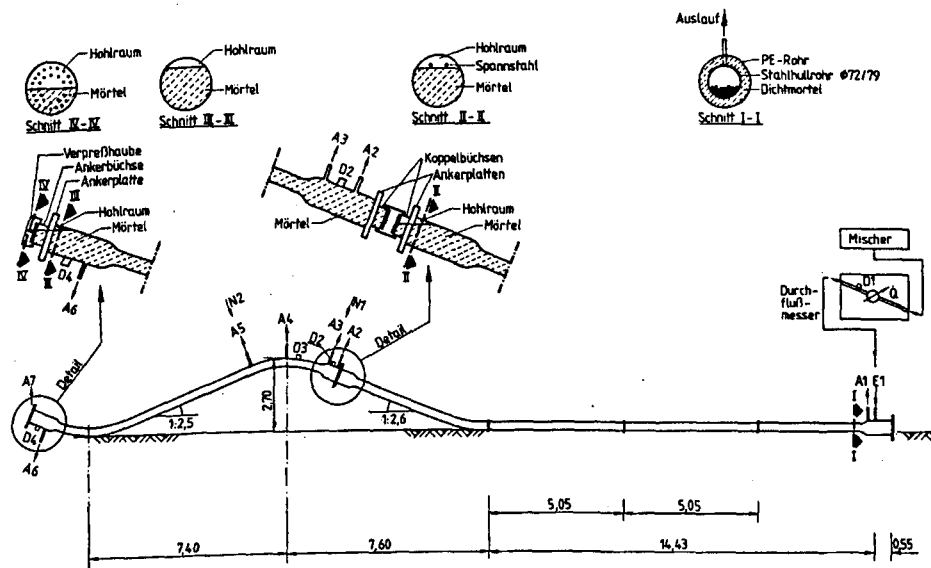


Bild 7.8: Spannglied mit Ein- und Auslauföffnungen im Verpreßzustand

Das Einpressen mußte während des Verpreßvorgangs für ca. 2,0 min. unterbrochen werden, da der Mörtel der ersten beiden Mischchargen verbraucht und eingepreßt war. Es wurde eine weitere Mischung hergestellt. Nach der Unterbrechung des Fließprozesses konnte der bereits eingepreßte Mörtel problemlos wieder in Bewegung gesetzt werden. Mit der dritten Mischcharge konnte das Spannglied vollständig gefüllt werden.

Bild 7.9 zeigt die Fließgeschwindigkeit im Spannglied sowie den Druck D 1, gemessen zwischen Swibo-Pumpe und Einpreßöffnung E 1, während des Verpreßvorgangs. Die

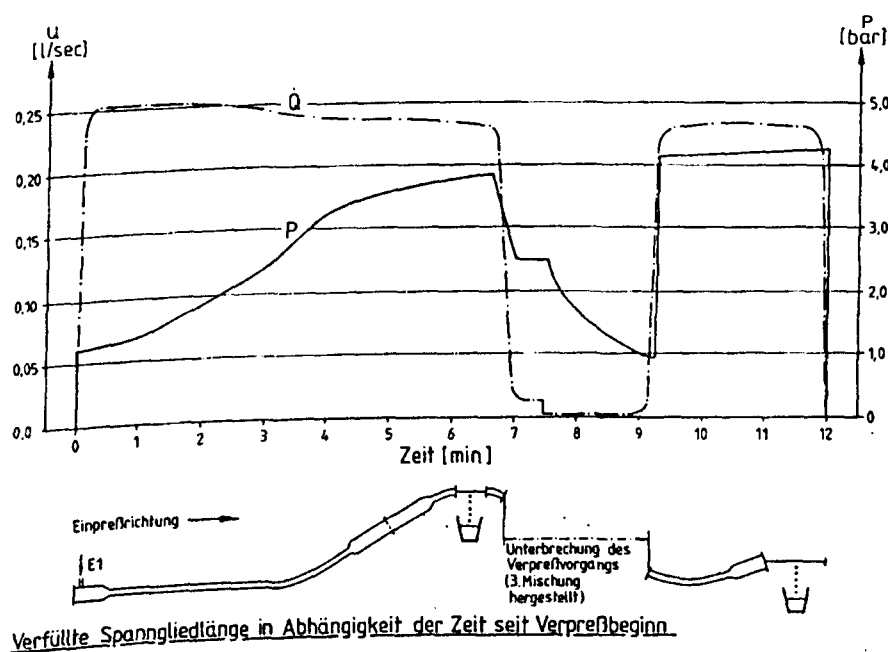


Bild 7.9 Einpreßgeschwindigkeit und -druck während des Verpreßvorgangs

Unterbrechung des Verpreßvorgangs knapp 7 min nach dem Verpreßbeginn ist in dem Bild 7.9 deutlich zu erkennen. Bei Abfall der Fließgeschwindigkeit fiel auch der Druck ab. Ca. 9 min nach Verpreßbeginn war die dritte Mischcharge hergestellt, so daß der Verpreßvorgang fortgesetzt werden konnte. Fließgeschwindigkeit und Druck stiegen wieder an.

Während des Verpreßvorgangs von der Einfüllöffnung E 1 wurden die Auslauföffnungen A 1 bis A 7 geschlossen, sobald bei ihnen Mörtel austrat. Die Auslauföffnungen wurden in folgender Reihenfolge geschlossen: A 1, A 2, A 3, A 4 (es kam etwas Mörtel), A 6, A 7, A 5, siehe Anlage 3. Auslauföffnung A 4 wurde wieder geöffnet und anschließend geschlossen.

Eine halbe Stunde nach dem ersten Verpressen wurde der Hochpunkt von den Auslauföffnungen A 3 = N 1 (Nachverpreßstelle 1) und von der Auslauföffnung A 5 = N 2 nachverpreßt. Die Öffnung A 4 (Hochpunktentlüftung) wurde geöffnet bis Mörtel austrat. Nachdem von N 2 aus nachverpreßt worden war, wurde senkrecht auf der Auslauföffnung A 4 ein durchsichtiges 1,50 m hohes transparentes PVC-Rohr ( $D = 36 \text{ mm}$ ) befestigt. Von der Nachpreßöffnung N 2 wurde Mörtel nachinjiziert, bis in dem transparenten PVC-Rohr eine 1,35 m hohe Mörtelsäule über dem Hochpunkt stand. Das Verhalten des Mörtels im durchsichtigen Standrohr wurde in den folgenden Stunden beobachtet.

In den ersten Minuten nach Ende des Nachverpressens stieg Wasser im Zentrum des durchsichtigen Rohres nach oben. Die Mörtelsäule stieg um ca. 8 mm an. Durch das Ansteigen der Mörtelsäule kam es zur Druckentspannung im Spannglied. Zehn Minuten nach Beendigung des Nachpressens stand eine 4,5 mm hohe Wassersäule im Standrohr; nach 30 min: 6,4 mm; nach 1 h: 11,0 mm; nach 2 h: 12,0 mm; nach 18 h: 2 mm.

Nach Abschluß des Verpressens wurde am Durchflußmesser ein Gesamtdurchflußvolumen von  $V_{\text{ges}} = 147,78 \text{ l}$  abgelesen. Zur Bestimmung des eingepreßten Mörtelvolumens muß vom Gesamtvolumen das an den Auslauföffnungen mit Eimern aufgefangene Mörtelvolumen von 28,0 l abgezogen werden. In das Spannglied wurden einschließlich Einfüll- und Auslaufrohren  $V = V_{\text{ges}} - V_{\text{Eimer}} = 147,78 - 28,0 = 119,78 \text{ l}$  Mörtel eingepreßt. Das Volumen je lfm Spannglied betrug  $V = 3,04 \text{ l}$ . Bei einer Spanngliedlänge von ca. 31,0 m betrug das Spanngliedvolumen  $V = 94,2 \text{ l}$  ohne die Volumina aus Koppelanker, Ankertrumpeten und Verpreßhauben. Eine genauere Volumenbilanz ist aufgrund der zur Verfügung stehenden Daten nicht möglich. Vor dem Verpreßvorgang sollte das zu verpressende Volumen mit dem Vakuum-Verfahren gemessen werden. Dieses gelang jedoch nicht, da das Spannglied nicht unter  $p = 200 \text{ mbar}$  evakuiert werden konnte. Ursache dafür war der offenbar nicht ausreichend dichte Magerbeton im vorgespannten Spanngliedabschnitt.

## 7.4.2 Überprüfung des Verpresserfolg am zersägten Spannglied

### 7.4.2.1 Überblick

Das Spannglied wurde zur Begutachtung sieben Tage nach dem Verpressen zersägt, um den Verpreßerfolg zu untersuchen. Der nicht vorgespannte Teil des Spannglieds wurde mit Hilfe einer Diamantsäge in ca. 2,0 m lange Abschnitte geschnitten.

Bei dem vorgespannten Spanngliedabschnitt wurde zunächst der umgebende Magerbeton entfernt, so daß das Spannglied frei im Stahlbetontrog lag. Etwa in der Mitte zwischen Hoch- und Tiefpunkt wurde das Spannglied auseinander geschweißt, so daß das Spannglied an Hoch- und Tiefpunkt getrennt aus dem Trogprofil gehoben werden konnte. Beim Herausheben wurde darauf geachtet, daß das Spannglied nicht gebogen wurde, um Rißbildung im Mörtel zu vermeiden.

Bild 7.10 zeigt die Orte, an denen der Verpreßerfolg durch Zersägen des Spannglieds untersucht wurde. Die Untersuchungsstellen sind durch Fotos in den Anlagen A-7.7 ff dokumentiert.

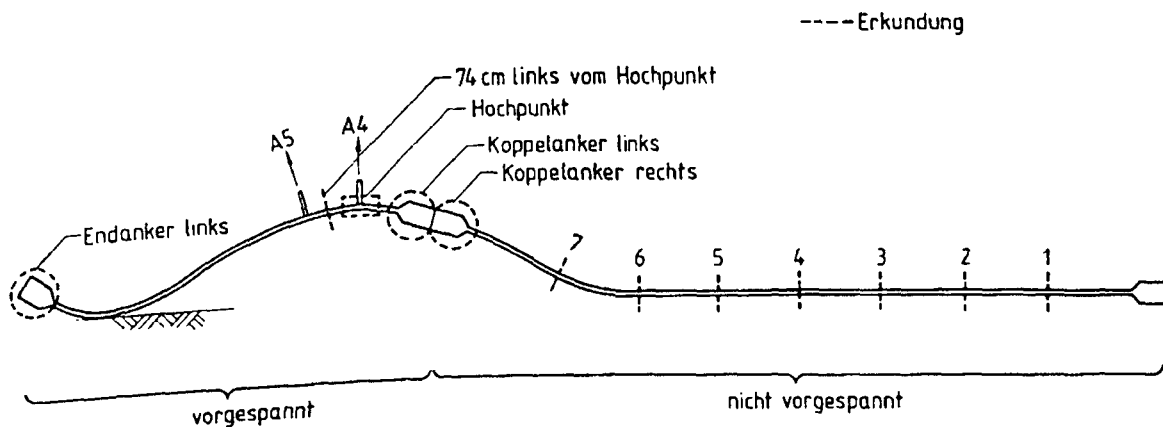


Bild 7.10: Orte der Spanngliederkundung nach Erhärtung

### 7.4.2.2 Nicht vorgespannter Abschnitt

Im nicht vorgespannten Spanngliedabschnitt lagen die 42 Drähte  $\varnothing 7$  in der unteren Hälfte des Hüllrohres. Die Drähte lagen als Bündel überwiegend so dicht zusammen, daß mit bloßem Auge zwischen den Drähten keine Zwischenräume festzustellen waren. Das deutet darauf hin, daß die Drähte die größte Packungsdichte erreicht hatten, s. Anlagen A-7.7.



An einigen Schnitten war das Drahtbündel an den Rändern etwas aufgelöst, so daß einige Drähte nicht direkt im Bündel lagen. Teilweise war das Drahtbündel durch Zwischenräume (ca. 2 - 3 mm Durchmesser) aufgeweitet.

Das Spannglied war in allen Schnitten vollständig mit Mörtel gefüllt, auch kleine Spalte zwischen den Drähten. Durch das Sägen war der Mörtel an den Schnittflächen teilweise aus den kleinen Zwischenräumen herausgefallen. Weiter von der Schnittfläche entfernt, waren die kleinen Zwischenräume mit Mörtel gefüllt.

### **7.4.2.3 Vorgespannter Abschnitt**

#### **Hochpunkt**

Im Bereich des Hochpunktes wurde das Hüllrohr auf einer Länge von ca. 60 cm an den Seiten längs aufgetrennt und abgewickelt, s. Anlagen A-7.8 und A-7.9. Die Drähte lagen aufgrund der Vorspannung unten am Hüllrohr an. Im Hüllrohrscheitel hatte sich von der Hochpunktentlüftung A 4 in beiden Richtungen auf einer Länge von ca. 50 cm ein durchgehender ca. 1,0 cm breiter Kanal gebildet. Die Ausbildung des Kanals ist auf Wasserabsondern während der Erhärtung zurückzuführen.

Auf der Unterseite lag der Spannstahl am Hüllrohr an. In den Spalt zwischen Hüllrohr und Spannstahl war beim Verpressen Mörtel eingedrungen. Da der Spalt nur sehr klein war, lösten sich die Mörtelstücke beim Abwickeln des Hüllrohres teilweise vom Spannstahl und fielen zu Boden. Die verbliebenden Mörtelstücke wiesen darauf hin, daß der Spalt zwischen Hüllrohr und Spannstahl gut mit Mörtel gefüllt war.

Nach Entfernen der losen Mörtelstücke war zwischen den Drähten der Blick weiter ins Innere des Drahtbündels frei. Die Spanndrähte lagen entweder so dicht zusammen, daß mit bloßem Auge keine Zwickel zwischen den Drähten zu sehen war, oder größere Zwickel (2 - 3 mm Durchmesser) gut mit Mörtel gefüllt waren. Von der Auslauföffnung A 5 in Richtung Tiefpunkt war das Hüllrohr bis in die Scheitel der Sicken vollständig mit Mörtel gefüllt.

#### **Übergangsbereich**

Etwa 74 cm links vom Hochpunkt (in Richtung Tiefpunkt) wurde das Spannglied quer zerschnitten, s. Anlage A-7.10. Die Spanndrähte lagen an dieser Stelle nicht mehr als ein Bündel zusammen. Es handelt sich um den Übergangsbereich vom Hoch- zum Tiefpunkt. Über den Querschnitt war das Spannglied vollständig mit Mörtel gefüllt. Beiderseits des

Schnittes wurde das Hüllrohr teilweise entfernt. Das Spannglied war bis in die Sicken des Hüllrohres vollständig mit Mörtel gefüllt.

#### 7.4.2.4 Koppelanker

Die Trompete des Koppelankers wurde auf der rechten Seite an der Oberseite geöffnet. Nahe der Ankerplatte hatte sich auf einer Länge von ca. 5 cm eine ca. 10 cm breite Linse gebildet.

Die Linse war an der Oberseite mit sehr porösen Mörtelspuren (wie "fester Schaum") bedeckt. Der "feste Schaum" konnte durch Reiben mit dem Finger leicht entfernt werden. Die Linse war nach unten durch eine ebene Fläche begrenzt. Der Neigungswinkel entsprach dem Neigungswinkel des Spannglieds an dieser Stelle während des Verpressens. Beide Hinweise deuten darauf hin, daß der Hohlraum infolge Wasserabsondern entstanden ist. Im Bereich des Hohlraumes lagen unter dem "festen Schaum" zwei Spanndrähte frei.

Der Hohlraum hätte wahrscheinlich vermieden werden können, wenn eine Entlüftung genau am Hochpunkt der Trompete angeordnet gewesen wäre. Zwischen den beiden Ankerplatten war der Koppelanker vollständig mit Mörtel gefüllt.

Die linke Trompete des Koppelankers (in Richtung Spanngliedhochpunkt) wurde an der Oberseite im Bereich von Auslauföffnung A3 und Druckaufnehmer D2 geöffnet. Die Trompete war dort vollständig mit Mörtel gefüllt.

#### 7.4.2.5 Linke Endverankerung

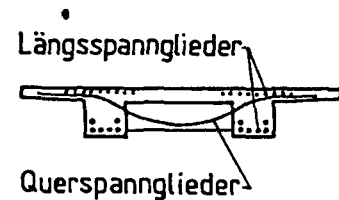
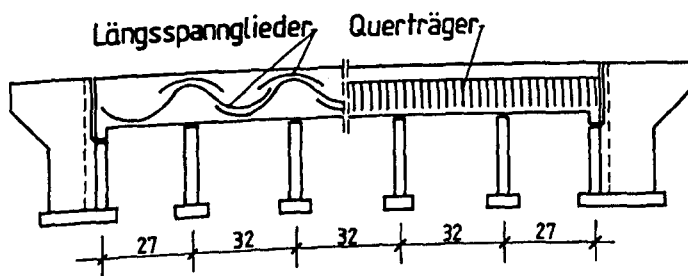
An der linken Endverankerung wurde die Verpreßhaube vorsichtig von der Ankerplatte gelöst. Der darunter freigelegte Ankerkopf war nur in der unteren Hälfte mit Mörtel gefüllt. In der oberen Hälfte waren keine Anzeichen zu erkennen, daß sie zu irgendeiner Zeit mit Mörtel gefüllt war. Es kann deswegen ausgeschlossen werden, daß der Hohlraum infolge von Wasserabsondern entstanden ist. Es ist anzunehmen, daß die Entlüftung an der Verpreßhaube während des Verpreßvorgangs nicht geöffnet war.

Die Trompete am linken Endanker wurde an ihrer Oberseite geöffnet. Ausgehend von der Ankerplatte hatte sich auf der Oberseite ein ca. 2 cm breiter Kanal auf einer Länge von ca. 8 cm gebildet. Der Kanal ist infolge Wasserabsondern entstanden. Im Bereich des Hohlraums lagen keine Spanndrähte frei.

## 7.5 Verpreßarbeiten im Rahmen einer Spanngliedsanierung

### 7.5.1 Allgemeines

An einer fünffeldrigen Brücke (Spannweite 27 m und 32 m) wurden bei einer Brückenprüfung bereichsweise nicht verfüllte Quer- und Längsspannglieder vorgefunden. Die Brücke ist Anfang der 60er Jahre errichtet worden. Bei dem Spannverfahren handelt es sich um ein Drahtspannverfahren. Die Brücke ist in Bild 7.11 schematisch dargestellt.



*Übersicht*

Bild 7.11: Verpreßarbeiten im Rahmen einer Spanngliedsanierung an einer 35 Jahre alten Brücke

An den nicht verfüllten Spanngliedabschnitten wiesen die Spannstähle an der Oberfläche leichten Flugrost auf. Korrosionsnarben waren nicht erkennbar. Die Spannkanele waren trocken.

Der Bauherr beschloß, die nicht verfüllten Spannglieder zu sanieren. Alle Spannglieder wurden zur Erkundung an Hoch- und Tiefpunkten angebohrt (Bohrlöcher B1 - B4), Bild 7.12. Bei fehlender oder teilweiser Verfüllung am Erkundungspunkt sollten die Spannglieder nachträglich verpreßt werden. Dabei sollte das zu verpressende Volumen mit dem Vakuum-Verfahren gemessen werden. Anschließend sollten die Hohlräume mit Vakuum-Unterstützung verfüllt werden. Über die Anwendung des Vakuum-Verfahrens zum nachträglichen Verfüllen von Spanngliedern wurde bereits mehrfach berichtet [51], [41], [63]. Nachfolgend wird auf die Sanierung eingegangen.

### 7.5.2 Kunststoffmodifizierter Einpreßmörtel

Aufgrund der kleinen zu verfüllenden Hohlräume wurden besondere Anforderungen an die Fließfähigkeit des Einpreßmörtel gestellt. Dieser sollte besonders dünnflüssig sein und über eine gute Langzeitverarbeitbarkeit verfügen. Außerdem sollte das Wasserabsondern minimal sein. Ähnliche Empfehlungen werden bei nachträglichem Verfüllen von Spanngliedern mit dem Vakuum-Verfahren gegeben [41]. Die Tauchzeit nach dem Mischen sollte demnach um  $t_{Ta} = 15 \text{ sec.}$

Für die Verpreßarbeiten wurde ein sehr dünnflüssiger Epoxidharz-Mörtel und ein kunststoffmodifizierter Zementmörtel ausgewählt. Der Epoxidharz-Mörtel wurde nur bei sehr kleinen Hohlräumen verwendet, um eine vollständige Füllung auch kleinster Zwickel sicherzustellen. Für das Erstverpressen von Spanngliedern ist Epoxidharz-Mörtel aufgrund seiner Eigenschaften und seines hohen Preises nicht zu empfehlen. Auf diesen Mörtel wird deswegen nicht weiter eingegangen.

Der kunststoffmodifizierte Mörtel scheint demgegenüber wegen seiner Alkalität auch für das Erstverpressen von Spanngliedern geeignet. Für die Verpreßarbeiten wurde der gleiche kunststoffmodifizierte Mörtel verwendet, der in Kap. 4 beschrieben wurde. Bezüglich der Mörtel Eigenschaften wird deswegen darauf verwiesen. Die in Kap. 4 angegebenen Werte beziehen sich teilweise auch auf Ergebnisse während der Verpreßarbeiten.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß die Langzeitverarbeitbarkeit bei Zugabe der Kunststoffdispersion im Vergleich zum reinen Zementmörtel deutlich verbessert werden konnte. Bei dem verwendeten Gehalt an Kunststoffdispersion wurden bezüglich Wasserabsondern und Festigkeit keine Nachteile festgestellt.

### 7.5.3 Extreme Temperaturen

Aufgrund der aufwendigen Erkundungsarbeiten erstreckten sich die Sanierungsarbeiten über 10 Monate. Die Verpreßarbeiten mußten dementsprechend bei extremen Temperaturen ausgeführt werden. In den Wintermonaten wurden Bauwerkstemperaturen von  $T = 5\text{ °C}$  unterschritten, im Sommer wurden Bauwerkstemperaturen bis  $T = 29,4\text{ °C}$  erreicht.

Bei den Verpreßtagen im Winter lag die Mörteltemperatur bei  $T = 10\text{ °C}$ . Das Verpressen wurde bei Bauwerkstemperaturen unter  $T = 5\text{ °C}$  eingestellt, insbesondere wenn in der Nacht noch tiefere Temperaturen erwartet wurden.

In den Sommermonaten wurden Mörteltemperaturen bis  $T = 26,0\text{ °C}$  erreicht. Um dem schnellen Ansteifen während der Verarbeitung vorzubeugen, wurden die Verpreßarbeiten in den frühen Morgenstunden ausgeführt. Die Ergebnisse der Eignungsprüfungen sind in Tab. 5.5 und 5.6 bereits erwähnt.

Beim Vergleich der Tauchzeiten fällt auf, daß die Tauchzeiten nach dem Mischen trotz sehr unterschiedlicher Mörteltemperaturen nur gering schwankten. Die Tauchzeit nahm bei hoher Temperatur jedoch bis zum 30 Minuten-Wert schneller zu als bei niedriger Temperatur. Die Volumenänderung war bei tiefen Temperaturen kleiner als bei hohen Temperaturen (tiefe Temperatur:  $\Delta V < 1,0\%$ , hohe Temperatur  $\Delta V > 1,0\%$ ).

### 7.5.4 Vakuummessung

Im Rahmen der Sanierungsmaßnahme wurden über 400 Spannglieder durch Bohrungen erkundet (Bohrlöcher B1 - B4), siehe Bild 7.12. Bei den nicht oder teilweise verfüllten Spanngliedern wurde der Hohlraum mit dem Vakuum-Verfahren erkundet. Den Arbeitsablauf zeigt Bild 7.12 schematisch.

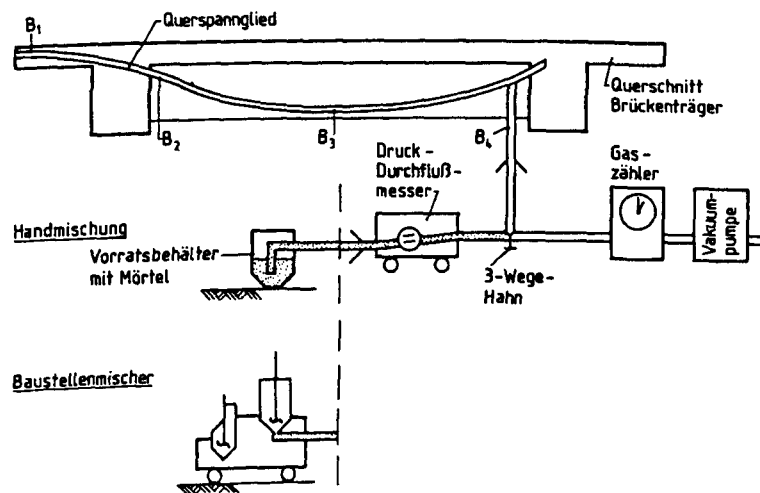


Bild 7.12: Vakuum-Verfahren zur Hohlraummessung und zum Unterstützen des Verpressens

Zur Hohlraummessung wurden die Spannglieder einschließlich Verbindungsschläuchen dreimal bis unter  $p = 100$  mbar evakuiert. Die nach dem Evakuieren zurückströmende Luft wurde mit einer Gasuhr gemessen. Aus den drei Messungen wurde der Mittelwert gebildet. Das zu verpressende Spanngliedvolumen ergab sich nach Abziehen der Volumina der Verbindungsschläuche zwischen Gasuhr und Spannglied.

Zum vakuumunterstützten Verpressen wurde das Spannglied nochmals auf  $p = 100$  mbar evakuiert. Der Mörtel war bei kleinen Verpreßchargen in einen Drucktopf gefüllt. Bei großen Chargen wurde der Mörtel mit einem Baustellenmischer hergestellt. Drucktopf oder Baustellenmischer waren über ein 3-Wege-Hahn mit dem Spannglied verbunden. Nach Aufbringen des Vakuums wurde mit dem 3-Wege-Hahn die Verbindung Spannglied-Vakuumpumpe geschlossen; gleichzeitig wurde die Verbindung Spannglied-Drucktopf freigegeben, so daß der Mörtel vakuumunterstützt in das Spannglied gepreßt wurde.

Beim Verpressen mit dem Druckbehälter wurde das Bruttogewicht vom Behälter einschließlich Mörtel vor und nach dem Füllen des Spannglieds gemessen. Das eingepreßte Mörtelvolumen wurde über die Mörteldichte bestimmt. Beim Verpressen mit dem Baustellenmischer wurde das eingepreßte Mörtelvolumen entweder über eine

Füllstandsanzeige am Vorratsbehälter oder mit dem magnetisch-induktiven Durchflußmesser gemessen.

Bei den Verpreßarbeiten stimmte das mit dem Vakuum-Verfahren gemessene Spanngliedvolumen sehr gut mit dem eingepreßten Mörtelvolumen überein. Die Volumendifferenz zwischen Sollvolumen und eingepreßtem Volumen betrug bei allen Spanngliedern unter  $\Delta V < 1,5$  Liter, i.M.  $\Delta V = 0,5$  Liter.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß mit einer Kombination aus Vakuum-Verfahren und magnetisch-induktiver Durchflußmessung eine zuverlässige Volumenbilanz möglich ist. Die vorgestellten Verfahren sind deswegen zur Volumenbilanz zu empfehlen.

Die Volumenmessung mit dem Vakuum-Verfahren ist beim Erstverpressen evtl. nicht für alle Spannglieder erforderlich. Bei gleichen Spanngliedern (Typ, Länge) kann es ausreichend sein, jeweils bei einem Spannglied das zu verpressende Volumen mit dem Vakuum-Verfahren zu bestimmen. Das eingepreßte Mörtelvolumen sollte hingegen für jedes Spannglied gemessen werden.

## 7.6 Verpreßversuch mit Mikrozement

Im Rahmen der Versuche mit Mikrozement wurde auch ein 15 m langes Spannglied verpreßt. Das Spannglied war über einen Sattel gelegt. Der Versuchsaufbau entspricht jenem der Verpreßversuche an Modellrohren mit Sattel (s. Bild 7.3). Als Hüllrohr wurde ein PVC-Rohr verwendet ( $d_a/d_i = 67/60$ ). Im Hüllrohr waren 5 Litzen ( $A_p = 100 \text{ mm}^2$ ) eingelegt. Diese waren nicht vorgespannt.

Das Spannglied wurde vom linken Tiefpunkt aus verpreßt. Die Auslauföffnungen am Hochpunkt sowie 1,5 m links und rechts davon wurden geschlossen, sobald der Mörtel die jeweiligen Punkte passiert hatte. Das Spannglied wurde mit einer Geschwindigkeit von 8 m/min verpreßt.

Die Ergebnisse der Eignungsversuche mit Mikrozement sind in Kap. 4.6 angegeben. Aufgrund der geringen Tauchzeit von  $t_{Ta} = 6,2$  sec nach dem Mischen baute sich während des Verpreßvorgangs an der Einpreßpumpe kein Druck auf.

Der Mörtel floß bergauf in einer Druckleitung, bergab in einem Freispiegelgerinne. Nachdem der Mörtel den Hochpunkt passiert hatte, wurde das Spannglied von unten nach oben gefüllt, vergl. Bild 7.2-a. Die Luft konnte an der Hochpunktentlüftung entweichen. Am Ende des Verpreßvorgangs vom linken Tiefpunkt war das Spannglied vollständig mit Mörtel gefüllt.

Das Mörtelverhalten im Spannglied wurde während der Erhärtung beobachtet. In den ersten Stunden kam es geringfügig zum Wasserabsondern. Das Wasser sammelte sich punktuell im Hüllrohrscheitel. Größere zusammenhängende Kanäle bildeten sich nicht aus.

Bereits 24 h nach dem Verpressen wurden Netzkrisse im Mörtel festgestellt. Diese traten überwiegend im Hüllrohrscheitel auf. Das PVC-Rohr wurde nach 7 Tagen teilweise entfernt, um die Risse näher zu untersuchen. Die Rißbreite betrug zwischen  $w = 0,1$  und  $0,9$  mm. Die Risse sind wahrscheinlich auf Schwinden zurückzuführen. Die vergleichsweise großen Rißbreiten sind offenbar darauf zurückzuführen, daß bei dem Spannglied ein großer Querschnitt mit Mikrozement verfüllt wurde. Ursprünglich wurden Mikrozemente demgegenüber für das Verfüllen kleiner Hohlräume entwickelt (Boden- und Rißinjektion).

Bei den Verpreßversuchen mit Einpreßmörteln gemäß DIN 4227, T. 5 wurden im Vergleich dazu keine Risse festgestellt. Derzeit verfügbare Mikrozemente sind deswegen für das Verpressen von Spanngliedern nicht geeignet.

## 7.7 Zusammenfassung und Empfehlungen für die Verpreßarbeit

- Bei einer Tauchzeit von  $t_{Ta} \approx 40$  sec änderte sich die Ausbildung der Mörtelfront im Hüllrohr.
- Der Druckverlust änderte sich mit der Fließgeschwindigkeit im Hüllrohr. Bei Zementmörtel ist ein Anfangsdruck erforderlich, um den Mörtel in Bewegung zu bringen.
- Mörtel mit einer Tauchzeit von  $40 \leq t_{Ta} \leq 75$  sec nach dem Mischen sind für das Verpressen gut geeignet. Sie sollten mit einem Kolloidalmischer hergestellt werden. Die Tauchzeit kann dann nach 30 Minuten  $t_{Ta} > 80$  sec sein. Sie ist damit größer als die zulässige Tauchzeit gemäß DIN 4227, T. 5 und pr EN 445 und pr EN 447. Spannglieder konnten mit derartigen Mörtel dennoch gut verpreßt werden.
- Abgesondertes Wasser sammelt sich in den ersten  $t = 3$  h nach dem Verpressen im Hüllrohrscheitel und an Hochpunkten. Nach 24 h ist das Wasser vom Mörtel wieder aufgesogen. Hohlräume bleiben zurück. Die Neigung eines Mörtels zum Wasserabsondern kann durch Eignungsversuche gemäß pr EN 445 und pr EN 447 an durchsichtigen Gefäßen aufgedeckt werden.
- Restwasser im Spannglied kann durch Druckluft nicht in jedem Fall ausgetrieben werden. Es wird erst durch die Mörtelfront aus dem Spannglied transportiert. Der Verpreßvorgang sollte deswegen erst dann abgeschlossen werden, sobald an der Auslauföffnung eine ausreichend Menge homogenen Mörtels ausgetreten ist.

- Im Bereich von Hochpunkten des Spannglieds und von spezifischen Hochpunkten (Aufweitung von Ankertrompeten und Koppelanker) sollten zusätzliche Entlüftungen bzw. Auslauföffnungen angeordnet werden, von denen diese gezielt nachverpreßt werden können (vergl. Kap. 2).
- Die Druck-Durchflußmessung ist für eine kontinuierliche Dokumentation des Verpreßvorgang zu empfehlen. Mit dem Durchflußmesser kann die Fließgeschwindigkeit gemessen und entsprechend den Vorgaben der Zulassung eingestellt werden.
- Mit einem Durchflußmesser kann das eingepreßte Mörtelvolumen einfach und zuverlässig gemessen werden. Derzeit kann nur durch den Mörtelaustritt am Spanngliedende auf die Füllung des Spannglieds geschlossen werden. Mit einem Durchflußmesser ist eine Volumenbilanz möglich. Die Volumenbilanz stellt einen Nachweis über die Füllung dar und ist als qualitätssichernde Maßnahme anzusehen.
- Das zu verfüllende Sollvolumen einschließlich Aufweitungen, Verpreßhauben und Einpreßröhrchen kann für jedes Spannglied mit dem Vakuum-Verfahren sehr genau ermittelt werden. Das Vakuum-Verfahren ist als Ergänzung zur Durchflußmessung anzusehen. Im Vergleich zur Durchflußmessung ist es aufwendiger. In Abhängigkeit der Genauigkeitsanforderung kann es ausreichend sein, bei identischen Spanngliedern nur bei einem Spannglied das Sollvolumen mit dem Vakuum-Verfahren zu ermitteln.
- Die Erkundung und Sanierung von unvollständig verpreßten Spanngliedern ist sehr aufwendig. Es ist deswegen zu empfehlen, daß gerade das Erstverpressen mit höchster Sorgfalt und von fachkundigem Personal ausgeführt wird. Außerdem gehören eine optimale Mörtelauswahl, moderne Gerätetechnik und günstige Randbedingungen (z.B. Temperatur) dazu.



## 8 ANWENDUNG DER STRÖMUNGSMECHANIK AUF DAS VERPRESSEN VON SPANNGLIEDERN

### 8.1 Ziel

Das Fließen des Zementmörtels stellt eine nichtideale Rohrströmung dar, weil zum einen der Mörtel eine Nicht-Newton'sche Flüssigkeit ist und zum anderen die Spannstähle den Rohrquerschnitt vermindern. Im folgenden werden auf Basis der Strömungsmechanik die wichtigsten Beziehungen und Parameter, die den Fließvorgang beeinflussen, zusammengestellt. Es soll der Zusammenhang zwischen der über den Tauchversuch beschreibbaren Viskosität, der Fließgeschwindigkeit und dem Druckverlust hergeleitet werden. Hierdurch sollen Hilfsmittel zur Planung der Verpreßarbeit entwickelt werden.

### 8.2 Strömungsmechanische Grundlagen

#### 8.2.1 Eigenschaften von Flüssigkeiten

Flüssigkeiten werden durch eine Schubbeanspruchung in Bewegung gesetzt. Über die Flüssigkeitshöhe  $h$  stellt sich ein Geschwindigkeitsprofil ein (Bild 8.1).

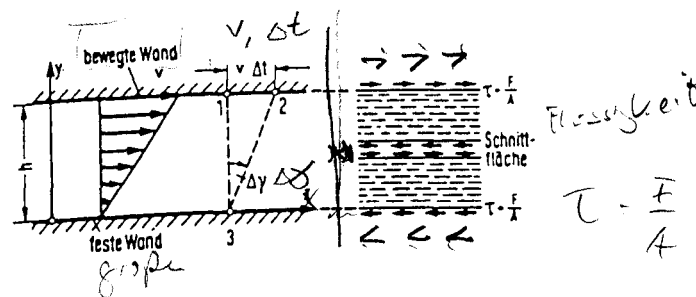


Bild 8.1 Geschwindigkeitsprofil über eine Flüssigkeitsschicht, aus [99]

Bei einer Newton'schen Flüssigkeit ist die Schubspannung  $\tau$  proportional zur Schergeschwindigkeit  $\dot{\gamma}$ :

$$\tau = \dot{\gamma} \eta, \quad (8.1)$$

Die dynamische Viskosität  $\eta$  ist bei einer Newton'schen Flüssigkeit eine Stoffkonstante, die von der Temperatur und dem Druck abhängt.

Bei einer Bingham Flüssigkeit muß zunächst die Fließgrenze  $\tau_f$  überwunden werden, ehe die Flüssigkeit in Bewegung gesetzt werden kann. Die Schubspannung  $\tau$  ergibt hierbei zu:

$$\tau = \tau_f + \dot{\gamma} \eta.$$

(8.2)

Besteht kein linearer Zusammenhang zwischen Schubspannung und Schergeschwindigkeit, handelt es sich um eine Nicht-Newtonsche Flüssigkeit, Bild 8.2. Dilatante und

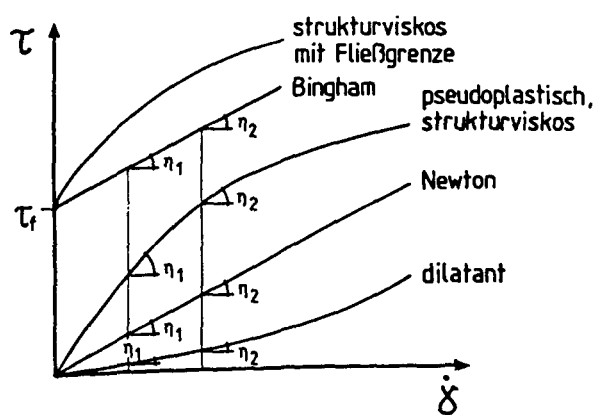


Bild 8.2: Schubspannung in Abhängigkeit der Schergeschwindigkeit für unterschiedliche Flüssigkeiten

strukturviskose Flüssigkeiten sind Beispiele hierfür. Bei diesen Flüssigkeiten ist die Viskosität keine Stoffkonstante. Besitzen dilatante oder strukturviskose Flüssigkeiten gleichzeitig eine Fließgrenze, werden sie als dilatante bzw. strukturviskose Bingham-Flüssigkeiten bezeichnet [98]. Bei thixotropen Flüssigkeiten nimmt die Viskosität bei anhaltender Scherbeanspruchung ab. Nach Beendigung der Scherbeanspruchung nimmt die Viskosität aufgrund erneuter Strukturbildung wieder zu. Die Strukturbildung ist reversibel. Zementmörtel besitzt auch thixotrope Eigenschaften [5], [75], [94]. Einen Überblick über die unterschiedlichen Flüssigkeiten und deren Eigenschaften gibt Tab. 8.1.

Tab 8.1 Eigenschaften unterschiedlicher Flüssigkeiten

Art der Flüssigkeit	Eigenschaft	Beispiele
Newton	$\tau = \dot{\gamma} \eta$	Wasser, Öl, Polyglykol-Wasser-Gemisch
Bingham	$\tau = \tau_f + \dot{\gamma} \eta$	
strukturviskos/ pseudoplastisch	$\dot{\eta} < 0$	Zementmörtel
dilatant	$\dot{\eta} > 0$	
thixotrop	reversible Strukturbildung	Zementmörtel

Bei einer Nicht-Newton'schen Flüssigkeit kann für jede Schergeschwindigkeit  $\dot{\gamma}$  eine scheinbare Viskosität  $\eta'(\dot{\gamma})$  bestimmt werden. Diese ergibt sich aus dem Schnittpunkt der Ursprungsgeraden mit dem entsprechenden Schnittpunkt der  $\tau$ - $\dot{\gamma}$ -Linie, bzw.  $\tau$ - $v$ -Linie (Bild 8.3). Die scheinbare Viskosität  $\eta'$  gilt nur für eine bestimmte Schergeschwindigkeit  $\dot{\gamma}$ . Über die scheinbare Viskosität kann eine Bingham'sche Flüssigkeit für eine spezielle Schergeschwindigkeit wie eine Newton'sche Flüssigkeit behandelt werden.

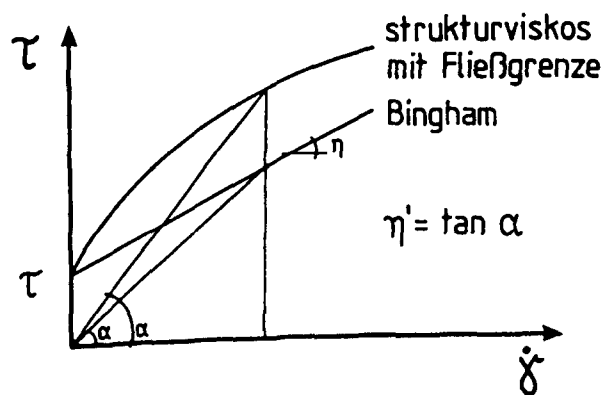


Bild 8.3: Scheinbare Viskosität für eine strukturviskose und eine Bingham-Flüssigkeit

### 8.2.2 Rohrströmung

In der Strömungsmechanik unterscheidet man zwischen laminarer und turbulenter Strömung. Phänomenologisch handelt es sich bei der laminaren Strömung um eine Schichtenströmung über den Rohrquerschnitt. Demgegenüber stellt die turbulente Strömung eine Wirbelströmung mit starkem Queraustausch dar. Die Strömungsart hängt von zahlreichen Parametern ab und kann über die Reynoldszahl unterschieden werden. Die Reynoldszahl  $Re$  ergibt sich aus

$$Re = \frac{\rho v d}{\eta} \quad [-] \quad (8.3)$$

Der Wechsel von laminarer zu turbulenter Strömung erfolgt bei einer kritischen Reynoldszahl von  $Re = 2.320$ :  $Re < 2.320$  laminar;  $Re > 2.320$  turbulent. Darüber hinaus unterscheidet man bei laminarer Strömung zwischen der Grenzströmung ( $Re \rightarrow 2.320$ ) und der schleichenden Strömung ( $Re \rightarrow 0$ ,  $Re \approx 1,0$ ), [39], [99].

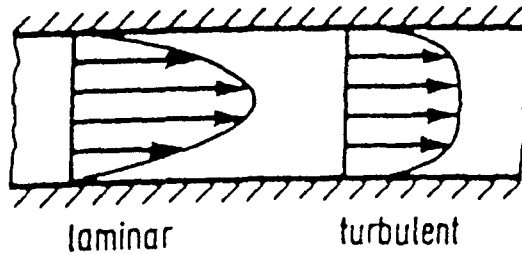


Bild 8.4: Laminare und turbulente Rohrströmung, aus [6]

Über die Re-Zahl lassen sich verschiedene Strömungen miteinander vergleichen. Weisen zwei Strömungen mit unterschiedlichem Fließmedium die gleiche Re-Zahl auf, so sind die Strömungen mechanisch ähnlich. Über die Re-Zahl können reale Strömungen im Modellmaßstab abgebildet werden.

Bei der Spanngliedinjektion liegt bei den üblichen Einpreßgeschwindigkeiten von  $v = 5 - 15 \text{ m/min}$  ( $0,0833 - 0,25 \text{ m/sec}$ ) und den entsprechenden Rohrdurchmessern eine laminare Strömung vor. Der Rohr widerstand  $\lambda$  hängt dann nur von der Re-Zahl ab. Die Wandrauheit spielt keine nennenswerte Rolle, da ein makroskopischer Queraustausch fehlt [6], [99]. An der Rohrwand bildet sich eine Grenzschicht. Über den Querschnitt bildet sich eine Schichtenströmung mit einem parabelförmigen Geschwindigkeitsprofil aus, vergl. Bild 8.4, [6].

Beim Fließen einer Nicht-Newton'schen Flüssigkeit mit einer ausgeprägten Fließgrenze  $\tau_f$  muß die Wandschubspannung zunächst größer werden als die Fließspannung  $\tau_f$ , um die Flüssigkeit in Bewegung zu setzen. Im Rohr bilden sich zwei Strömungszonen aus. In der inneren Zone ist die Schubspannung  $\tau$  kleiner als  $\tau_f$ . Um die Kernzone herum bildet sich eine äußere Zone, in der die Schubspannung  $\tau$  größer als die Fließspannung  $\tau_f$  ist. In dieser Zone verhält sich das Medium wie eine Newton'sche Flüssigkeit. Dort stellt sich eine parabelförmige Geschwindigkeitsverteilung ein [6].

Nachfolgend werden die wesentlichen Beziehungen der Rohrströmung dargestellt. Das Gleichgewicht der Kräfte ist in Bild 8.5 erläutert. Bei einer Rohrströmung steht der Druckverlust  $\Delta p$  über die Rohrlänge  $l$  mit der Wandschubspannung  $\tau$  im Gleichgewicht

$$\Delta p \frac{\pi d^2}{4} = \tau \pi d l \quad . \quad (8.4)$$

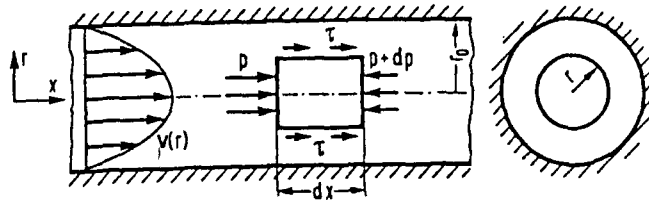


Bild 8.5 Angreifende Kräfte bei einer Rohrströmung, aus [39], [6]

Die Gesamtenergie wird für die Rohrströmung durch die Bernoulli-Gleichung beschrieben

$$\frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} = h \quad (8.5)$$

Der Druckverlust  $\Delta p$  infolge Rohrreibung hängt bei laminarer Rohrströmung vom Rohrwiderstand  $\lambda$  ab

$$\Delta p = \frac{\rho}{2} v^2 \frac{l}{d} \lambda \quad (8.6)$$

Da die Wandrauheit bei einer laminaren Strömung keinen nennenswerten Einfluß ausübt, hängt der Rohrwiderstand  $\lambda$  nur von der Reynolds-Zahl ab, Gl. (8.7)

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (8.7)$$

Aus Gl. (8.6) erhält man mit den Gln. (8.3) und (8.7) den Druckverlust einer Rohrströmung über die Länge l:

$$\Delta p = 32 \nu \frac{l}{d^2} \eta \quad (8.8)$$

Gl. (8.1) - Gl. (8.8) gelten für eine Rohrströmungen mit Kreisdurchmesser. Werden anstatt eines Kreisrohres beliebige Rohrquerschnitte verwendet, muß der geometrische Durchmesser d durch den hydraulischen Durchmesser  $d_{hy}$  ersetzt werden. Dieser ist das Verhältnis von Fließquerschnitt A zu benetztem Umfang U

$$d_{hy} = 4 \frac{A}{U} \quad (8.9)$$

Die Strömungsversuche von Zementmörtel in Modellrohren und Spanngliedern haben ergeben, daß die Re-Zahl bei üblichen Einpreßgeschwindigkeiten etwa  $Re \approx 1,0$  beträgt. Strömungsmechanisch liegt also eine schleichende Strömung vor. Der Druckabfall  $\Delta p$  in

einem Rohrabschnitt wird somit im wesentlichen von der Haftreibung und weniger von der Strömungsreibung bestimmt.

### 8.3 Bestimmung materialspezifischer Fließparameter aus Verpreßversuchen

Bei den Verpreßversuchen an den Modellrohren wurde der Druckverlust bei unterschiedlicher Fließgeschwindigkeit gemessen. Die Versuche wurden sowohl mit Newton'schen Flüssigkeiten und als auch mit Zementmörteln durchgeführt. Die Versuche mit Newton'schen Flüssigkeiten dienten in erster Linie zur Kalibrierung der Meßeinrichtung und zur Verifizierung des Berechnungsmodells. Im folgenden werden die wesentlichen Fließparameter ausgewertet.

Die Schubspannung erhält man über Gl. (8.4) zu

$$\tau = \frac{\Delta p d_{hy}}{4 l} \quad (8.10)$$

bei gemessenem Druckverlust und gemessener Fließgeschwindigkeit  $v$ . Im Bild 8.6 sind für

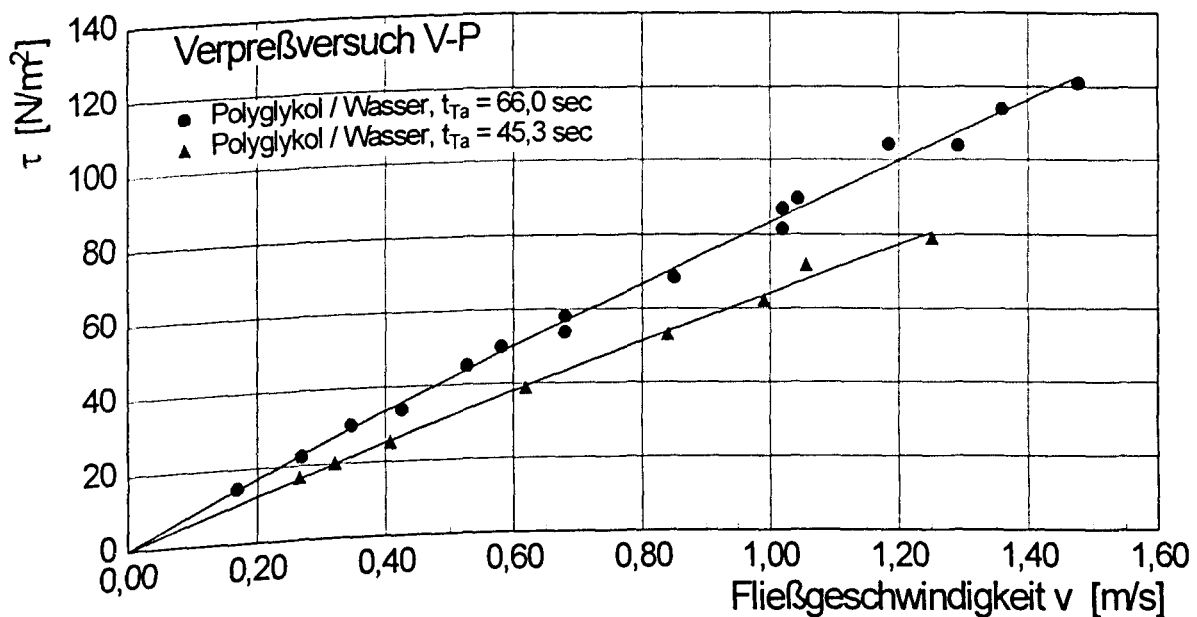


Bild 8.6: Schubspannung in Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit für die Newton'schen Flüssigkeiten

die Newton'schen Flüssigkeiten die  $\tau$ - $v$ -Diagramme dargestellt. Im Bild 8.7 ist die Viskosität über der Fließgeschwindigkeit aufgetragen.

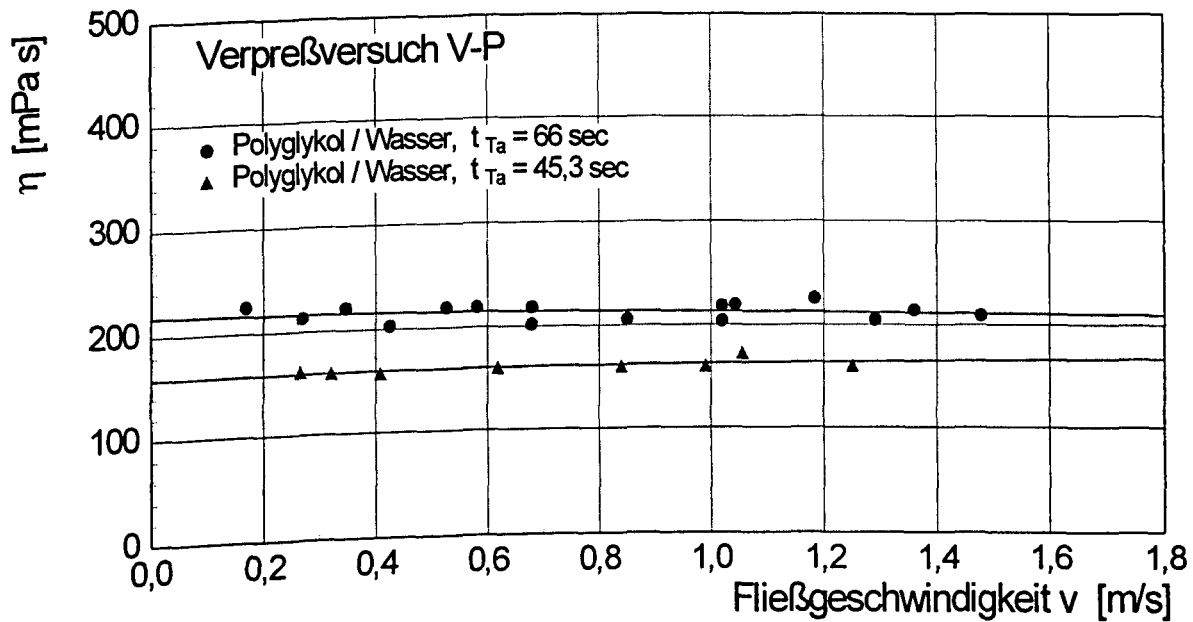


Bild 8.7: Dynamische Viskosität der Newton'schen Flüssigkeiten bestimmt aus den Verpreßversuchen mit Modellrohren

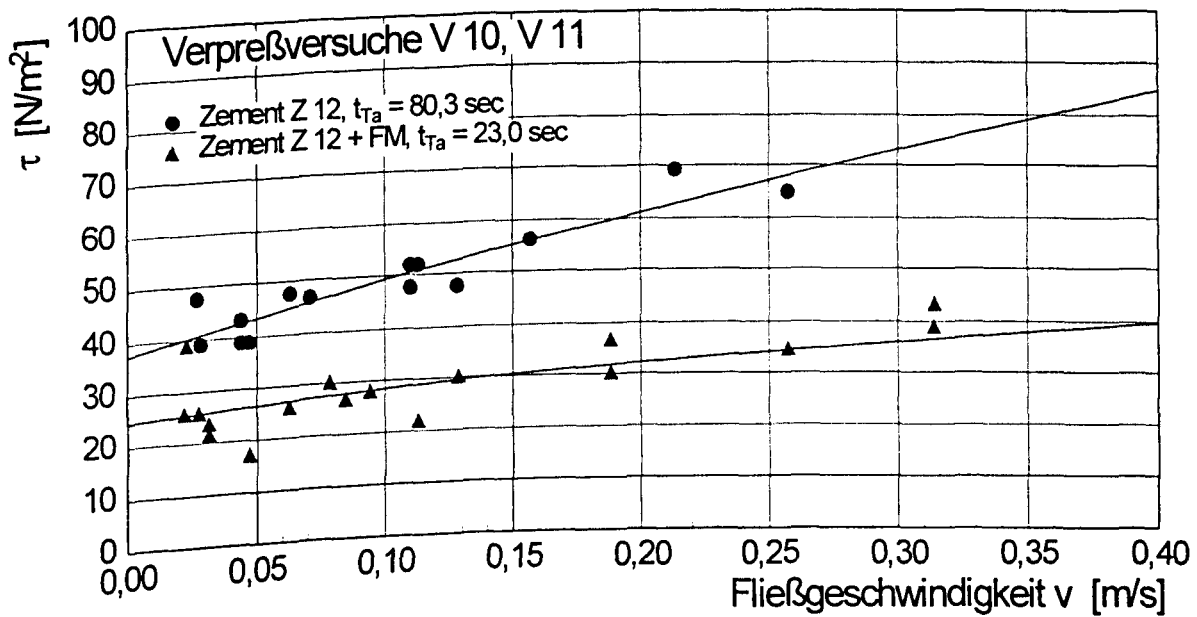


Bild 8.8: Schubspannung in Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit für Zementmörtel

Im Bild 8.8 sind die  $\tau$ - $v$ -Diagramme für die Zementmörtel dargestellt (sämtliche Ergebnisse s. Anlage A-8.1). Durch Umstellung von Gl. (8.8) kann man die geschwindigkeitsabhängige scheinbare Viskosität des Zementmörtels ausdrücken

$$\eta'(v) = \frac{\Delta p d_{hy}^2}{32 v l} \quad (8.11)$$

Bild 8.9 zeigt das Ergebnis der Auswertung (sämtliche Ergebnisse s. Anlage A-8.2). Die scheinbare Viskosität nimmt mit zunehmender Fließgeschwindigkeit ab. Im baupraktischen Bereich der Verpreßgeschwindigkeit ist deren Veränderung eher gering.

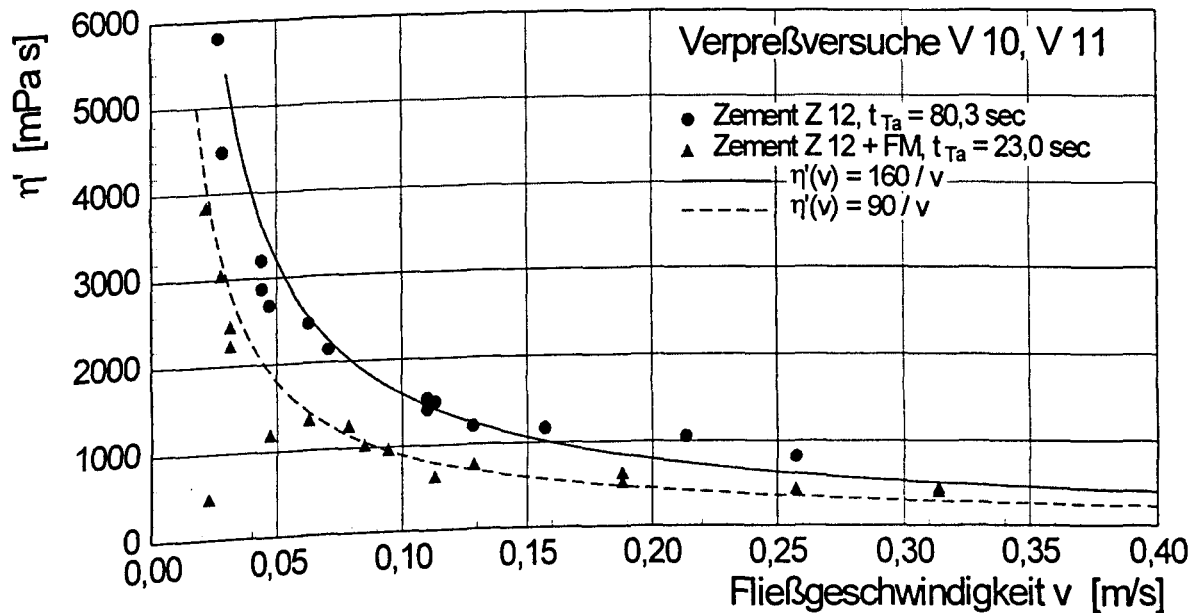


Bild 8.9: Scheinbare Viskosität von Zementmörtel bestimmt aus Verpreßversuchen mit Modellrohren

Die Abnahme der scheinbaren Viskosität von Zementmörtel mit zunehmender Fließgeschwindigkeit läßt darauf schließen, daß sich bei großer Fließgeschwindigkeit in der Übergangszone Wand/Mörtel eine dünnflüssige, wasserreiche Schicht ausbildet (Bild 8.10). Dadurch wird der Scherwiderstand reduziert. Die "wirksame Viskosität" wird kleiner.

Eine Wasseranreicherung ist möglich, da Zementmörtel inhomogen ist. Die Zementkörner liegen dispergiert im Wasser vor. Eine Newton'schen Flüssigkeit ist demgegenüber homogen. Bei Zementmörtel wird der Fließwiderstand nicht von der Viskosität der Flüssigkeit, sondern in erster Linie von der Viskosität der Übergangszone bestimmt. Die Viskosität von Zementmörtel ist demnach als materialspezifischer Fließwiderstand der Übergangszone anzusehen.



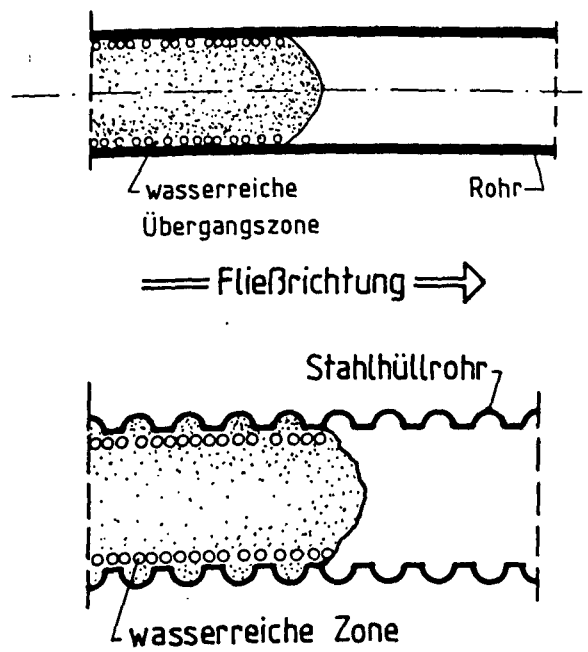


Bild 8.10: Ausbildung einer wasserreichen Übergangszone bei großer Fließgeschwindigkeit des Zementmörtels

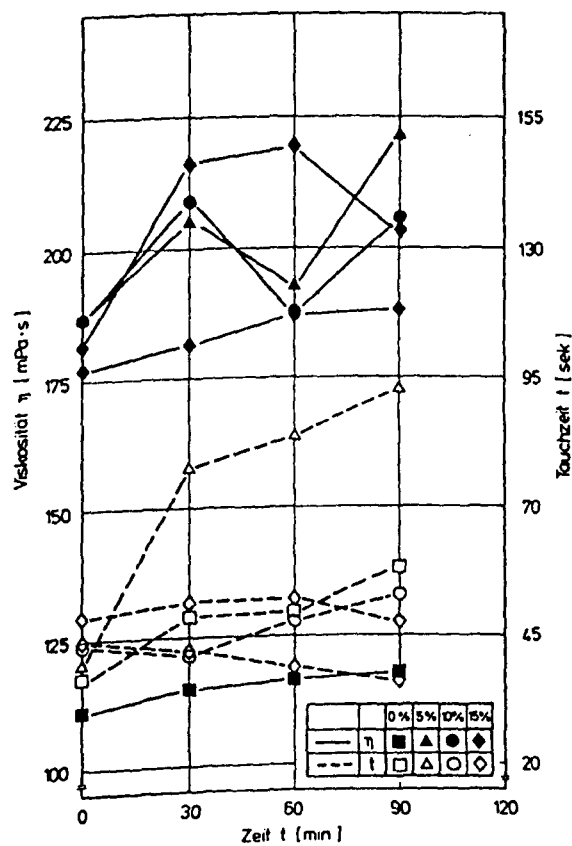


Bild 8.11: Viskosität eines MS-modifizierten Einpreßmörtels bei  $T = 20^\circ\text{C}$  in Abhängigkeit vom Mörtelalter, aus [63].

In der Vergangenheit ist die scheinbare Viskosität  $\eta'$  von Zementmörtel mehrfach mit drehzahlgesteuerten Rotationsviskosimetern gemessen worden [43], [74], [75], [78]. Bei den Ergebnissen wurde überwiegend nur ein Viskositätswert in Abhängigkeit vom Mörtelalter angegeben [63], [74], [78], und zwar jener Wert, der bei maximaler Drehzahl ermittelt wurde. Bild 8.11 zeigt exemplarisch die Ergebnisse der Literatur.

Die bei den Verpreßversuchen ermittelten scheinbaren Viskositäten  $\eta'$  sind bei vergleichbaren Tauchzeiten größer als jene, die mit einem Rotationsviskosimeter bestimmt wurden. Dieses ist darauf zurückzuführen, daß die Schergeschwindigkeit bei maximaler Drehzahl im Rotationsviskosimeter größer ist als bei praxisüblichen Verpreßgeschwindigkeiten von Spanngliedern ( $0,05 \text{ m/s} \leq v \leq 0,25 \text{ m/s}$ ).

#### 8.4 Bestimmung der scheinbaren Viskosität auf Basis der Verpreßversuche und der Tauchzeit

Die in Bild 8.9 dargestellte Abhängigkeit der scheinbaren Viskosität von der Fließgeschwindigkeit kann durch den Ansatz

$$\eta'(a, v) = \frac{a(t_{Ta})}{v} \quad (8.12)$$

mit:  $a$ , Proportionalitätsfaktor;  $v$ , Fließgeschwindigkeit (m/s);  $\eta'$ , scheinbare Viskosität (mPa s) beschrieben werden. Die Zementart, Zusammensetzung und Konsistenz des Einpreßmörtels sowie dessen Temperatur sind im Faktor  $a$  summarisch enthalten. Dieser wird in Abhängigkeit der Tauchzeit formuliert, da sie ebenfalls diese Einflußgrößen gemeinsam beschreibt. Außerdem ist die Fließgeschwindigkeit im Ringspalt des Tauchgerätes von gleicher Größenordnung wie bei praxisüblichen Verpreßgeschwindigkeiten von Spanngliedern, s. Kap 5. Die Strömungsverhältnisse sind somit ähnlich.

Die Auswertung aller Versuche mit Mörteln unterschiedlicher Tauchzeit zeigte, daß der Ansatz Gl. (8.12) allgemein gilt. Zwischen dem Faktor  $a$  und der Tauchzeit  $t_{Ta}$  kann ein linearer Zusammenhang angenommen werden:

$$a(t_{Ta}) = k_1 t_{Ta} + k_2 \quad (8.13)$$

Die Auswertung aller Verpreßversuche mit Mörteln unterschiedlicher Tauchzeit ergibt die im Bild 8.12 dargestellte Beziehung von

$$a(t_{Ta}) = 1,373 t_{Ta} + 61,228 \quad (8.14)$$

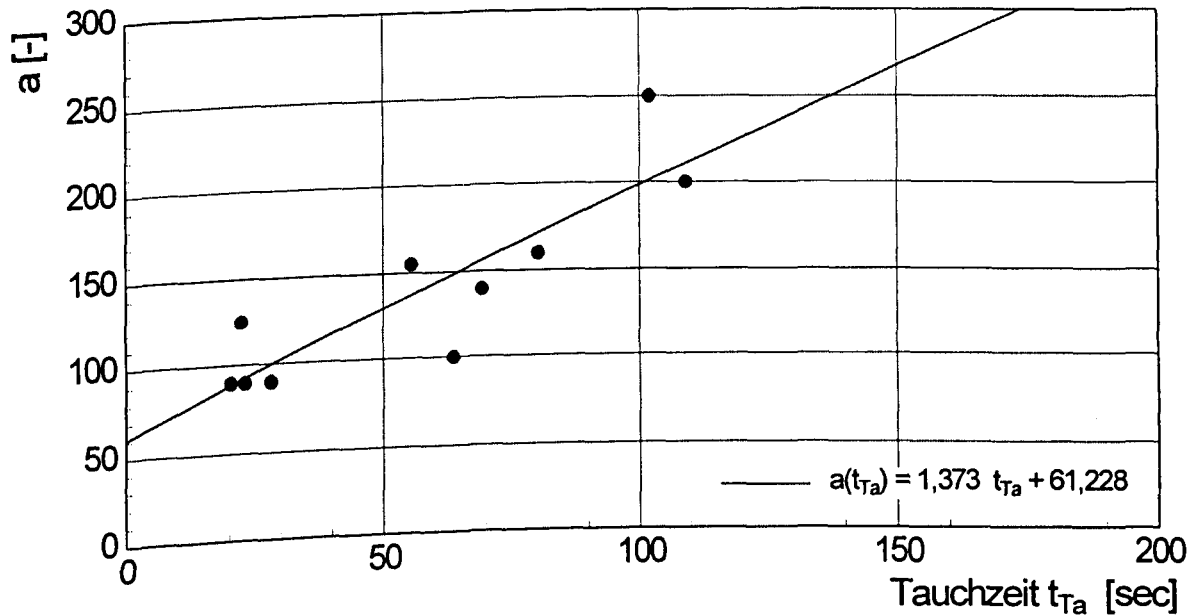


Bild 8.12: Zusammenhang zwischen Faktor  $a$  und der Tauchzeit

### 8.5 Hydraulisch wirksamer Durchmesser von Spanngliedern

Bei der Strömung von Zementmörtel im Hüllrohr mit gespannten Stählen kann man den Druckverlust entsprechend Gl. (8.8) ausdrücken

$$\Delta p = \frac{32 \nu l \eta'(\nu)}{d_{hy}^2} \quad (8.15)$$

Der hydraulische Durchmesser wird nach Gl. (8.9) durch den Fließquerschnitt und den benetzten Umfang beschrieben. Der Fließquerschnitt beträgt:

$$A = \frac{\pi d_h^2}{4} - \frac{n \pi d_p^2}{4} = \frac{\pi}{4} (d_h^2 - n d_p^2) \quad (8.16)$$

mit:  $d_h$ , Hüllrohrdurchmesser;  $d_p$ , Draht- bzw. äquivalenter Litzendurchmesser und  $n$ , Zahl der Spannstähle.

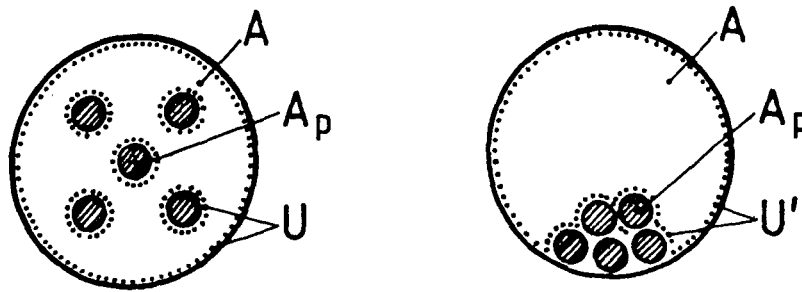


Bild 8.13: Fließquerschnitt und benetzter geometrischer Umfang  $U$  bei sich nicht berührenden Spannstählen (a) und beim Spannstahlbündel (b)

Der tatsächlich benetzte Umfang  $U'$  ist, wie in Bild 8.13 zeigt, geringer als der geometrisch bestimmte Umfang  $U$

$$U = \pi d_h + n \pi d_p \quad , \quad (8.17)$$

weil im gespannten und gekrümmten Spannglied der Querfluß des Mörtels behindert ist. Diese Tatsache läßt sich wie folgt ausdrücken:

$$U' < U$$

bzw.

$$k_u = \frac{U'}{U} \leq 1,0; \quad U' = k_u U \quad (8.18)$$

Die Größen  $U'$  bzw.  $k_u$  können durch einfache Überlegungen nicht abgeleitet werden. Es wird aber möglich, sie auf Basis der Ergebnisse der Verpreßversuche an Modellrohren und der Baustellenversuche an Litzenspanngliedern zu bestimmen, weil bei diesen alle in Gl. (8.15) enthaltenen Größen gemessen worden sind. Hierbei wird von den Gln. (8.9) und (8.15) ausgegangen:

$$d'_{hy} = 4 \frac{A}{U'} \quad . \quad (8.19)$$

bzw.

$$d'_{hy} = \sqrt{\frac{32 \nu l \eta'}{\Delta p}} \quad (8.20)$$

Hieraus erhält man dann einen Ausdruck für das Verhältnis von  $U'/U$  :

$$k_u = \frac{U'}{U} = \frac{4A}{U} \frac{1}{\sqrt{\frac{32 \nu l \eta'}{\Delta p}}} \quad (8.21).$$

Die zuvor erwähnten Versuche sind mit Gl. (8.21) ausgewertet worden. Das Ergebnis der Auswertungen ist in Bild 8.14 aufgetragen. Die Kreise in Bild 8.14 stellen die Versuchsergebnisse mit Newton'schen Flüssigkeiten dar. Die übrigen Symbole markieren die Ergebnisse der Verpreßversuche von Spanngliedern (Baustellen M, B, und W). Dabei handelt es sich um Mittelwerte aus den Einzelversuchen je Verpreßtag (ein verpreßtes Spannglied = Einzelversuch). Die jeweilige Anzahl der Einzelversuche ist durch Zahlen neben den Symbolen angegeben.

Bei den Baustellenversuchen an Brücken wurde der Druckverlust  $\Delta p$  aus der Differenz vom Verpreßdruck am Verpreßende zum dem am Verpreßanfang ermittelt:  $\Delta p = p_E - p_A$ . Die in Gl. (8.24) eingesetzte scheinbare Viskosität  $\eta'(v)$  wurde für die gewählte Verpreßgeschwindigkeit anhand der Tauchzeit mit Gl. (8.12) und Gl. (8.14) ermittelt.

Versuchsstreuungen resultieren zum einen aus der Messung von Druckverlust und Fließgeschwindigkeit, wobei die Druckverluste stärker streuten als die Fließgeschwindigkeiten; zum anderen durch Einsetzen der scheinbaren Viskosität  $\eta'(v)$  in Gl. (8.21) mit Gln. (8.12) und (8.14). Bei den Spanngliedern mit 12 Litzen betrug das arithmetische Mittel  $\bar{k}_u = 0,728$ , die Standardabweichung lag bei  $s = 0,085$ ; bei den Spanngliedern mit 19 Litzen war  $\bar{k}_u = 0,422$  und  $s = 0,045$ . Für das Abschätzen der unteren und oberen Grenze des Druckverlustes kann mit den Standardabweichungen gerechnet werden.

Das Verhältnis  $U'/U$  nimmt mit der Anzahl der Litzen im Rohr ab. Zwischen der Litzenzahl und dem benetzten Umfang  $U'$  besteht näherungsweise folgender linearer Zusammenhang:

$$k_u = \frac{U'}{U} = (-0,027 n + 1,0) \quad (8.22)$$

Bei den genannten Verpreßversuchen wurden 140 mm<sup>2</sup>-Litzen verwendet. Es ist davon auszugehen, daß die Beziehung  $k_u = U'/U$  auch für andere Litzenquerschnitte gilt. Der Füllungsgrad der Hüllrohre lag bei den Verpreßversuchen zwischen  $28 \leq A_H/A_P \leq 42 \%$ , somit im praxisüblichen Bereich.

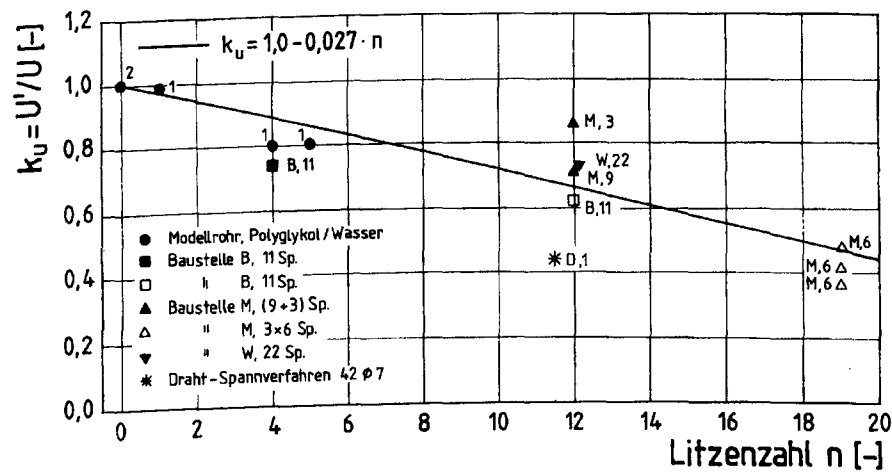


Bild 8.14: Verhältnis von  $U'/U$  für unterschiedliche Litzenzahl ( $A_p = 140 \text{ mm}^2$ ) im Hüllrohr (Füllungsgrad  $28 \leq A_p/A_h \leq 42 \%$ )

Der Stern in Bild 8.14 bezeichnet das Ergebnis des Verpreßversuches mit dem Drahtspannverfahren (42 Drähte  $\varnothing 7 \text{ mm}$ ). Die Spannstahtfläche wurde dabei auf eine äquivalente Litzenzahl mit  $A_p = 140 \text{ mm}^2$  umgerechnet und im Bild 8.14 aufgetragen. Für die Bestimmung des Verhältnisses  $k_u = U'/U$  wurde der geometrische Umfang  $U$  angesetzt. Das Verhältnis  $k_u = U'/U$  ist beim Drahtspannverfahren deutlich kleiner als bei einem vergleichbaren Litzenspannverfahren. Dies ist auf eine engere Packungsdichte der Drähte zurückzuführen. Durch den Litzenschlag tritt demgegenüber eine bessere Querläufigkeit auf, so daß der benetzte Umfang  $U'$  größer wird.

## 8.6 Druckverlust

Der Druckverlust auf der Spanngliedlänge ergibt sich aus Gl. (8.15) unter Berücksichtigung von Gl. (8.19) und (8.22):

$$\Delta p = \frac{2 \nu l \eta'(v) U'^2}{A^2} = \frac{32 \nu l \eta'(v) k_u^2}{d_{hy}^2} \quad (8.23)$$

Beim Verpressen von Spanngliedern muß der Einpreßmörtel oft über eine größere Distanz gefördert werden. Wegen des vergleichsweise kleinen Durchmessers des Verpreßschlauchs ( $d = 20 - 30 \text{ mm}$ ) von der Pumpe zum Verpreßstutzen des Spannglieds kann der Druckverlust in der Zuleitung bereits erheblich sein (Bild 8.15). Mit den zuvor abgeleiteten Beziehungen kann der Gesamtdruck als Summe der Druckverluste der jeweiligen Rohrabschnitte berechnet werden. Für zwei hintereinander geschaltete Rohrabschnitte erhält man

$$p = \Delta p_z + \Delta p \quad (8.24)$$

mit  $\Delta p_z$ , Durchkverlust in den Zuleitungen und  $\Delta p$  Druckverlust auf der Spanngliedlänge  $l$  (abgewickelte Länge). Man erhält

$$p = \frac{32 v_z l_z \eta'_z(v_z)}{d_{hy,z}^2} + \frac{32 v l \eta'(v)}{d_{hy}^2} \quad (8.25)$$

wobei Druckverluste durch Querschnittssprünge (Hüllrohrtüllen, Gleitkopplungsrohre) nur indirekt erfaßt werden können. Bei der Zuleitung entspricht der hydraulische Durchmesser  $d_{hy,z}$  dem freien Fließdurchmesser. Die Geschwindigkeit  $v_z$  kann nach dem Kontinuitätsprinzip

$$v_z = v \frac{A}{A_z} \quad (8.26)$$

für die gewählte Verpreßgeschwindigkeit  $v$  bestimmt werden.

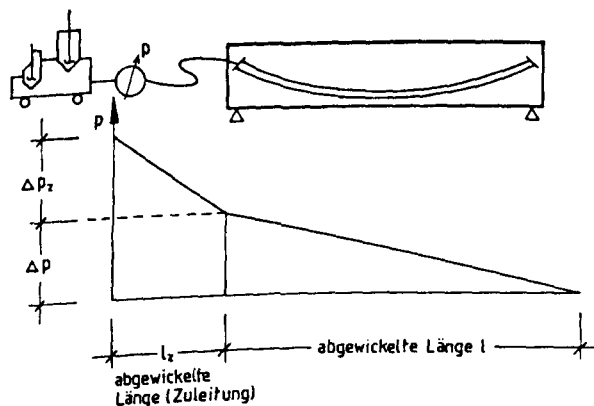


Bild 8.15: Summe der Druckverluste beim Verpressen von Spanngliedern (schematisch)

## 8.7 Zusammenfassung

Aufbauend auf den Ergebnissen der Strömungsmechanik konnten die materialspezifischen Fließparameter für Zementmörtel abgeleitet werden. Die scheinbare Viskosität nimmt bei üblichen Verpreßgeschwindigkeiten mit der Fließgeschwindigkeit deutlich ab. Die Abhängigkeit der scheinbaren Viskosität  $\eta'(v)$  von der Fließgeschwindigkeit konnte für Zementmörtel unterschiedlicher Konsistenz modelliert werden. Eingangsparameter ist die Tauchzeit.

Der hydraulische Durchmesser unterscheidet sich bei einem Spannstahlbündel im Rohr von jenem eines Kreisquerschnitts. Der hydraulische Durchmesser wurde anhand der Versuchsergebnisse durch Anpassen des benetzten Umfangs an die Verhältnisse im Hüllrohr angepaßt. Es wurde der hydraulische Durchmesser  $d'_{hy}$  mit dem benetzten Umfang  $U'$  eingeführt.

Mit den vorgestellten Modellen für die scheinbare Viskosität  $\eta'(v)$  und den hydraulischen Durchmesser  $d'_{hy}$  kann der Druckverlust infolge Rohrreibung für unterschiedlich fließfähige Mörtel abgeschätzt werden. Es wäre wünschenswert, die Anwendbarkeit der strömungsmechanischen Modelle auch auf den Fließtransport anderer Nicht-Newton'scher Flüssigkeiten im Bereich Bauwesen zu überprüfen.



## 9 ZUSAMMENFASSUNG

Das zuverlässige Verpressen von Spanngliedern mit Zementmörtel hängt von zahlreichen Faktoren ab, die sich teilweise gegenseitig beeinflussen. In der Vergangenheit sind bereits umfangreiche Arbeiten im Hinblick auf das Verpressen von Spanngliedern entstanden. Unter Berücksichtigung dieser Arbeiten sollten bisherige Kenntnisse zusammengefaßt und offene Fragen aus heutiger Sicht näher betrachtet werden. Die Forschungsarbeit hatte zum Ziel, Möglichkeiten zur Verbesserung der Zuverlässigkeit der Hüllrohrinjektion zu erarbeiten. Dabei sollten die wesentlichen Elemente eingehend betrachtet werden. Dazu gehörten:

- Mörtel und deren Eigenschaften,
- Maschinentechnik, besonders Mischtechnik,
- Prüfverfahren,
- Mörtelströmung im Hüllrohr.

Basierend auf Experimenten konnten ansatzweise Zusammenhänge zwischen physikalisch-chemischen Zementeigenschaften und Frischmörteleigenschaften hergestellt werden. Die Frischmörteleigenschaften werden durch Alkali-, C<sub>3</sub>A- und C<sub>2</sub>S-Gehalt sowie von Korngröße und -verteilung entscheidend beeinflusst. Gute Beurteilungskriterien für die zu erwartenden Mörtel Eigenschaften sind Wasseranspruch (nach DIN 1164), C<sub>3</sub>A-Reaktivität und Hydratationswärmeentwicklung. Bei der lasergranulometrischen Korngrößenuntersuchung hat sich herausgestellt, daß die Ergebnisse nur bei einem einheitlichen Prüfverfahren (Dispergiermethode) vergleichbar sind.

Die Mörtel Eigenschaften hängen neben den Ausgangsstoffen erheblich vom Mischverfahren ab. Derzeit sind Kolloidalmischer für die Herstellung eines homogenen Mörtels bevorzugt zu empfehlen. Aber auch mit anderen hochtourigen Mixern, bei denen hohe Turbulenzen im Mischbehälter erzeugt werden, können homogene Mörtel hergestellt werden.

Mit der zu erwartenden europäischen Normung für das Herstellen und Prüfen von Einpreßmörteln gehen auch Änderungen bei den Prüfverfahren einher. Die Fließfähigkeit kann demnach außer mit dem Tauchgerät auch mit einem Trichter (10 mm-Auslaufdüse) gemessen werden. Im Rahmen der Forschungsarbeit konnte gezeigt werden, daß das Tauchgerät zur Beurteilung der Fließfähigkeit besser geeignet ist. Es bildet die Strömungsverhältnisse bei der Hüllrohrinjektion besser ab.

Die Bestimmung von Volumenänderung und Wasserabsondern sollte gemäß pr EN 445 und pr EN 447 drei Stunden nach dem Mischen mit durchsichtigen Gefäßen geprüft werden. Die

Versuche zeigten, daß hierfür durchsichtige Standzylinder und -rohre größerer Höhe besser geeignet sind. Das Wasserabsondern ist ca. 3 h nach dem Mischen maximal, die Volumenänderung ist dann weitgehend abgeschlossen. Die Deutschland derzeit übliche Prüfung der abgesonderten Wassermenge 24 h nach dem Mischen erfaßt nicht den ungünstigsten Fall.

Verpreßversuche belegen, daß bei Mörteln mit starker Sedimentationsneigung Hohlräume durch Wasserabsondern entstehen. Deswegen sollte verstärktes Augenmerk auf die Neigung des Mörtels zum Wasserabsondern gelegt werden. Mit den Prüfverfahren nach pr EN 445 und 447 ist dies auch unter Baustellenbedingungen schnell und zuverlässig möglich.

Durch Mörtelmodifikationen mit FM, MS und Kunststoffdispersion konnten Mörtel Eigenschaften verbessert bzw. optimiert werden. Negative Einflüsse der physikalisch-chemischen Zementeigenschaften konnten so teilweise kompensiert werden. Die Zugabe von weiteren Zusatzmitteln und -stoffen außer EH erfordert jedoch weitere Eignungsprüfungen. Diese sind unter Baustellenbedingungen oft nicht möglich. Deswegen ist eine Abstimmung von Zusatzmitteln und -stoffen auf die Zementeigenschaften wünschenswert. Günstig wäre eine fertige Konfektionierung des Zementes mit allen erforderlichen Additiven. Voraussetzung dafür wäre eine Liberalisierung der Vorschriften bezüglich der Zugabe von Zusatzmitteln und -stoffen.

Weiterhin scheint die nach Norm [21], [29], [31] maximale Tauchzeit von  $t_{Ta(30)} \leq 80 \text{ sec}$  30 min nach dem Mischen zu gering. Bei den mit Kolloidalmischern hergestellten Mörteln können die Tauchzeiten 30 min nach dem Mischen deutlich größer sein. Durch bauaufsichtliche Zulassungen ist dies bereits geregelt. Im Rahmen der Versuche wurden Spannglieder auf Baustellen mit derartigen Mörtel von den Ausführenden zuverlässig verpreßt. Eine maximal zulässige Tauchzeit von  $t_{Ta(30)} = 150 - 180 \text{ sec}$  scheint angemessener.

Die Machbarkeit einer Volumenbilanz wurde durch zahlreiche Verpreßversuche auf Baustellen gezeigt. Wichtiges Element für die Volumenbilanz ist die Messung des eingepreßten Mörtelvolumens. Mit einer kontinuierlichen Druck-Durchflußmessung läßt sich die Verpreßarbeit als Gütekontrolle zuverlässig dokumentieren und überwachen.

Durch Verpreßversuche sowohl an Modellrohren als auch auf Baustellen wurden die Strömungsbedingungen und die Mörtel Eigenschaften studiert, um den Verpreßerfolg zu untersuchen. Neben qualitativen Aussagen zum Strömungsverhalten bergauf und bergab wurden Grundlagen der Strömungsmechanik auf das Verpressen von Spanngliedern angewendet. Die scheinbare Viskosität  $\eta'(v)$  konnte für unterschiedlich steife Mörtel in Abhängigkeit der Tauchzeit formuliert werden. Außerdem wurde der benetzte Umfang im Hüllrohr  $U'$  bei Spannstahlfüllung kalibriert. Die Besonderheiten der Rohrströmung beim

Verpressen von Spanngliedern mit Zementmörtel konnten auf diese Weise erfaßt werden, so daß die Verpreßbarkeit insbesondere langer Spannglieder mit Hilfe der Strömungsmechanik zuverlässiger abgeschätzt werden als bisher.

Aufgrund der komplexen Zusammenhänge, die zu einer zuverlässigen Hüllrohrinjektion führen, konnten nicht alle Auswirkungen erschöpfend untersucht werden. An einigen Punkten konnten aber hierfür Wege und Zusammenhänge aufgezeigt werden. Weitere Forschungsarbeit scheint im Hinblick auf den Zusammenhang zwischen den Zement- und Mörtel Eigenschaften erforderlich. Eine Optimierung von Einpreßmörteln ist bereits mit den derzeit zur Verfügung stehenden Mitteln möglich. Dafür ist Entwicklungsarbeit erforderlich. Die bereits heute verfügbare Maschinen- und Meßtechnik (Vakuumverfahren, Druck-Durchflußmessung) ist für die Ausführung und Überwachung der Verpreßarbeit sinnvoll einsetzbar.

## 10 LITERATUR

- [1] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung für Einpreßmörtel hergestellt mit dem SUSPA-Mischer Typ Swibo 1973, Zulassungsbescheid vom 01.07.82
- [2] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-13.1-14, Spannverfahren BBRV-SUSPA Ø 7mm, 1995
- [3] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-13.1-21, Litzenspannverfahren SUSPA 0,6"-Litzen, 1995
- [4] Banfill, P.F.G.: Rheology of fresh cement and concrete, E & FN Spon, März 1990
- [5] Banfill, P.F.G.: Rheological methods for assessing the flow properties of mortar and related materials, Construction and Building Materials 1994, Vol. 8, No. 1
- [6] Becker, E.: Technische Strömungslehre, Teubner-Verlag, 1993
- [7] Bielack, E.; Braun, G.; Mallon, T.; Jung, M.: Vorteile von expandierenden Einpreßhilfen in der Spannbetontechnologie, in FIP-Report 1990 - 1994
- [8] Benz, G.: Einpreßmörtel, Eigenverlag Chem. Fabrik Grünau, Illertissen, 3. Auflage 1984; 2. Teil: Literaturangaben
- [9] Bonfig, K. W.: Durchflußmessung von Flüssigkeiten und Gasen, expert-verlag, 1990
- [10] Chartschenko, I.J.; Volke, K.; Stark, J.: Untersuchungen über den Einfluß der pH-Wertes auf die Ettringitbildung, Zeitschrift der Wiss. Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar, Heft 39, S. 253 ff, 1993
- [11] Clark, G.: Post-tensioned prestressing cables in ducts, Concrete, July/August 1995
- [12] DASTb-Richtlinie, Richtlinie für Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen, DASTb, Teile 1 - 4, 1990 - 1992
- [13] DASTb-Richtlinie, zur Anwendung von DIN V ENV 206
- [14] DASTb-Richtlinie, zur Anwendung von EC 2
- [15] DBV-Jahresbericht 1992
- [16] Der Bundesminister für Verkehr - Abteilung Straßenbau, Schäden an Brücken und anderen Ingenieurbauwerken, bearbeitet v. R. Ruhrberg u. H. Schumann, Dokumentation 1982
- [17] Der Bundesminister für Verkehr - Abteilung Straßenbau, Erhaltungsarbeiten an Brücken und anderen Ingenieurbauwerken von Straßen, bearbeitet v. R. Ruhrberg, Dokumentation 1990
- [18] DIN 1164, Portland-, Eisenportland-, Hochofen- und Traßzement, Dez. 1986
- [19] DIN 4127, Schlitzwandtone für stützende Flüssigkeiten, Vornorm Januar 1984
- [20] DIN 4227, T. 1, Spannbeton; Bauteile aus Normalbeton mit beschränkter oder voller Vorspannung, Juli 1988

- [21] DIN 4227, T. 5, Spannbeton; Einpressen von Zementmörtel in Spannkanäle, Dez. 1979
- [22] DIN 18553, Hüllrohre aus Bandstahl für Spannglieder; Febr. 1980
- [23] DIN 18553, Hüllrohre aus Bandstahl für Spannglieder - Entwurf; März 1989
- [24] Domone, P.L.; Jefferis, S.A.: Structural Grouts, Chapman & Hall, 1994
- [25] EC 2, Planung von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken, T.1 Grundlagen und Anwendungsregeln für den Hochbau, Deutsche Fassung ENV 1992-1-1, Juni 1992
- [26] EC 2, Planung von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken, T.2, Stahlbeton- und Spannbetonbrücken
- [27] EN 196, Prüfverfahren für Zement
- [28] ENV 197, Zement - Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien
- [29] prEN 445, (entspricht DIN 4227, T.11), Spannbeton; Einpreßmörtel für Spannglieder, Prüfverfahren, Vorschlag zur Europäischen Norm, März 1991
- [30] prEN 446, (entspricht DIN 4227, T.12), Spannbeton; Einpreßmörtel für Spannglieder, Einpreßverfahren, Vorschlag zur Europäischen Norm, März 1991
- [31] prEN 447, (entspricht DIN 4227, T.10), Spannbeton; Einpreßmörtel für Spannglieder, Anforderungen für übliche Einpreßmörtel, Vorschlag zur Europäischen Norm, März 1991
- [32] EN 104.300, Zusatzmittel für Beton
- [33] Engelke, P.: Zum Stand der Einpreßtechnik im Spannbetonbau, Beton- und Spannbetonbau 6/1986, S. 147-150
- [34] Engelke, P.; Jungwirth, D.; Manns, W.: Zur Einpreßtechnik bei Spanngliedern mit mehr als 1.500 kN Spannkraft, in Mitteilungen vom Institut für Bautechnik, Jg. 10, 6/1979, S. 161-166
- [35] Fiedler, O.: Strömungs- und Durchflußmechanik, Verlag Oldenbourg, 1992, ISBN 3-486-22119-1
- [36] FIP-Guide to good Practice "Grouting of tendons in prestressed concrete", published by Thomas Telford LTD, London, 1990
- [37] FIP-State of the art report "Condensed silica fume in concrete", published by Thomas Telford LTD, London, 1988
- [38] Fleischer, W.: Einfluß des Zementes auf Schwinden und Quellen von Beton, TU München, Dissertation 1992
- [39] Gersten, K.: Einführung in die Strömungsmechanik, Vieweg-Verlag, 1992
- [40] Gjorv, O.E.; Loland, K.E.: Condensed silica fume in concrete, Institut for Byggingsmateriallaere, University of Trondheim, report February 1982
- [41] Gottstein v., V.: Nachträgliches Verfüllen von nicht verpreßten Spanngliedern mit dem Vakuumverfahren, in Spannbeton in der Bundesrepublik Deutschland 1983 - 1986, Beitrag zum internationalen Spannbetonkongreß in Neu Delhi 1986

- [42] Gross, D.; Hauger, W.; Schnell, W.; Wriggers, P.: Technische Mechanik Bd. 4, Springer Verlag, August 1993
- [43] Grübl, P.; Hög, R.: Anforderungen an den Einpreßmörtel zu Erzielung einer optimalen Schutzwirkung bei Spanngliedern mit nachträglichem Verbund, Schlußbericht zum Forschungsvorhaben, TH Darmstadt, Oktober 1995
- [44] Heuer, M.; Leschonki, K.: Erfahrungen mit einem neuen Gerät zur Messung von Partikelgrößenverteilungen aus Beugungsspektren, Patikelmess-technik, S. 515 - 538, 1984
- [45] Hope, B.B.; Ip, A.: Grout for post-tensioning ducts, ACI - journal, July-August 1988
- [46] IfBt, Sachverständigenausschuß "Spannverfahren", 14. Sitzung des SVA-A am 18.02.93
- [47] Ivanyi, G.; Rosa, W.: Füllen von Rissen und Hohlräumen im Konstruktionsbeton mit Zementsuspension, Beton- und Stahlbetonbau Nr. 87, Heft 9, 1992
- [48] Jungwirth, D.; Beyer, E.; Grübl, P.: Dauerhafte Betonbauwerke, Substanzerhaltung und Schadensvermeidung in Forschung und Praxis, Beton-Verlag, 1986
- [49] Kern, G.; Jungwirth, D.: Untersuchungsergebnisse an abgebrochenen Spannbeton-Brücken, die Jahrzehnte unter Verkehr standen, Beton- Stahlbetonbau 4[71, S. 86-93
- [50] Knoblauch, H.; Schneider, U.: Bauchemie, Werner-Verlag, 1992
- [51] Kordina, K.; Osteroth, H.-H.: Versuchsbericht Nr. G85 8281 - Ko/Ost über Versuche zum nachträglichem Verpressen von Spanngliedern mit dem Vakuumverfahren vom 16.01.86
- [52] Kordina, K.; Osteroth, H.: Zum nachträglichen Verpressen schwer zugänglicher Spannglieder, Bauingenieur 62 (1987), 159-164
- [53] Kühling, G.: Feinstzemente - mikrofeine hydraulische Bindemittel, Tiefbau, Ingenieurbau, Straßenbau, Heft 11, 1990
- [54] Kühling, G.: Rißverpressung mit Feinstzementen, Betonwerk + Fertigteil-Technik, Heft 3, 1992
- [55] Kühling, G.; Schulze, B.; Tax, M.: Neue Zusatzmittel für feststoffreiche Feinstzement-Suspensionen, Bauingenieur, Bd 67, Heft 11, 1992
- [56] Kühling, G.; Schulze, B.; Tax, M.: Verbesserung der Injizierbarkeit und der chemischen Widerstandsfähigkeit von Feinstzement-Suspensionen, Felsbau, Heft 2/1993
- [57] Kuipers, U.: Wirbel-Wirkdruck-Durchflußmessung, Forschungsberichte VDI, Reihe 8, Meß-, Steuer- und Regelungstechnik, Nr. 189
- [58] Lankard, D.R.; Thompson, N.; Sprinkel, M.M.; Virmani, Y.P.: Grouts for bonded post-tensioned concrete construction: protecting prestressing steel from corrosion, ACI Materials Journal, September-October 1993
- [59] Locher, F.W.; Richartz, W.; Sprung, S.: Erstarren von Zement, Zement-Kalk-Gips, Jg. 29, Heft 10, 1976, S. 435-442
- [60] Locher, F.W.; Richartz, W.; Sprung, S.: Erstarren von Zement, Zement-Kalk-Gips, Jg. 33, Heft 6, 1980, S. 271-277

- [61] Manns, W.; Zimbelmann, R.: Untersuchungen über die Fließeigenschaften des mit dem Swibo-Mischers hergestellten Einpreßmörtels, Bericht der FMFA Stuttgart vom 26.11.80
- [62] Manns, W.; Zimbelmann, R.: Einpreßmörtel mit langer Verarbeitungszeit, in DASTb-Heft 353, 1984
- [63] Manns, W.: Prüfbericht zur Anwendung des Vakuumverfahrens zum Einpressen von Zementmörtel in Spannkanele, IRB-Verlag, 10.04.83
- [64] Martin, H.: Materialuntersuchungen an Spannstahl und Einpreßmörtel; Karbonatisierung und Chloridgehalt des Betons; im Heft 271 DAfStb
- [65] Matt, P.: Qualitätsgesicherte und überwachbare Spannsysteme im Brückenbau, Eidgenössisches Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartment, Bundesamt für Straßenbau, Bericht zum Forschungsauftrag 81/89, September 1990
- [66] Matt, P.: Zerstörungsfreie Prüfung von Spanngliedern in bestehenden Brückenbauwerken, Eidgenössisches Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartment, Bundesamt für Straßenbau, Bericht zum Forschungsauftrag 52/88, Januar 1989
- [67] Mühe, L.; Illgner, W.: Vergleichende Einpreß- und Ausziehversuche an großen Spanngliedern, Beton- und Stahlbetonbau, Heft 3/75, S. 52-58
- [68] Mittelstädt, M.: Beitrag zum hydraulischen Feststofftransport quasi-homogener Suspensionen, Dissertation TU Braunschweig, Institut für Wasserbau, 1977
- [69] Nürnberger, U., Analyse und Auswertung von Schadensfällen an Spannstählen, Forschung, Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 308, herausgegeben von Bundesminister für Verkehr, 1980
- [70] PCI-Committee on Post-Tensioning, Recommended Practice for Grouting of post-tensioned prestressed concrete, PCI-Journal, November-December 1972
- [71] Podolny, E.: Corrosion of prestressing steels and its mitigation, PCI-Journal September-October 1992
- [72] Raiss, M.E.: Durable post-tensioned concrete bridges, Concrete, May/June 1993
- [73] Raiss, M.E.: Post-tensioned concrete bridges: the UK debate, Concrete, March/April 1995
- [74] Ranisch, E.-H.; Rostásy, F.S.; Herschermann, F.: Properties of cement grouts with silica fume addition for injection of post-tensioning ducts, Trondheim Conference 1989
- [75] Reul, H.: Rheologische Untersuchungen an Zementsuspension mit Fließmittel, Beton 10/78
- [76] Röhnisch, A.: Gutachten über die Injektion von 3 Endverankerungen der beim THTR-Schmehausen I vorgesehenen Horizontalspannglieder (145 Ø 7 mm) vom 15.11.74
- [77] Röhnisch, A.: Einpreßversuche mit Zementmörtel für Spannbeton, Vergleich der Ergebnisse von Modellversuchen mit Ausführungen in Hüllwellrohren, Mitteilungen des Institutes für Wasserbau, Heft 34, Universität Stuttgart, März 1975
- [78] Rostásy, F.S.; Ranisch, E.H.; Herschermann, F.: Untersuchungen der Eigenschaften von Einpreßmörteln mit Zusatz von Silikastaub, iBMB TU Braunschweig, 1987

- [79] Rostásy, F.S.; Scheuermann, J.: Verpreßversuche an Spanngliedern, Untersuchungsbericht iBMB, unveröffentlicht
- [80] Rostásy, F.S.; Gutsch, A.: Zuverlässigkeit des Verpressens von Spannkänen unter Berücksichtigung der Unsicherheiten auf der Baustelle, Zwischenbericht zum Forschungsvorhaben, iBMB TU Braunschweig, 1993
- [81] Rostásy, F.S.; Gutsch, A.: Abschlußbericht über die Fremdüberwachung der Verpreßarbeiten an Quer- und Längsspanngliedern an einer Brücke in Schleswig-Holstein, 1995, unveröffentlicht
- [82] Rostásy, F.S.; Gutsch, A.: Bericht über einen Verpreßversuch an einem Spannglied mit Drähten ohne Innenwendel, 1995, unveröffentlicht
- [83] Rostásy, F.S.: Untersuchungsbericht zu Schäden an einer Spannbetonbrücke, 1993, unveröffentlicht
- [84] Röthele, S.; Kesten, U.: Die Anwendung der Laserbeugung zur Partikelgrößenanalyse, in "The Application of laser diffraction technology, 2nd World Congress of Particle Technology", Japan, 1990
- [85] Röthele, S.; Naumann, H.; Heuer, M.: Die Anwendung der Fraunhofer-Beugung unter  $1\text{ }\mu\text{m}$  zur Partikelgrößenanalyse von  $0,1\text{ }\mu\text{m}$  bis  $2.000\text{ }\mu\text{m}$ , in 4. Europäische Symposium Partikelmeßtechnik, Nürnberg, 1989
- [86] Schütt, K.; Diederichs, U.; Rostásy, F.S.: Improvement of performance of grouts for corrosion protection of post-tensioning tendons by silica fume addition
- [87] Schupack, M.: Durability Study of a 35-year-old post-tensioned bridge, Concrete International, Februar 1994
- [88] Schupack, M.: Post-tensioning tendons after 35 years, Concrete International, March 1994
- [89] Schupack, M.: Protecting post-tensioning tendons in concrete structures, Civil Engineering-ASCE, Dec. 1982, S. 43 (siehe auch 9th FIP-Congress, Stockholm 1982)
- [90] Schupack, M.: A Survey of the Durability Performance of Post-Tensioning Tendons, ACI Journal, Oct. 1978
- [91] Schupack, M.; Suarez, M.G.: Some recent corrosion embrittlement failures of prestressing systems in the United States, PCI-Journal March/April 1982
- [92] SIA Norm 162, Schweizerische Norm für Betonbauten, Ausgabe 1989
- [93] Society's Design Group, Grouting Specifications, Concrete, July/August 1993
- [94] Spanka, G.; Grube, H.; Thielen, G.: Wirkungsmechanismen verflüssigender Betonzusatzmittel, Betontechnologische Berichte, Beton 11/95
- [95] U.S. Corps of Engineers CRD-C79-58, "Method of Test for Flow of Grout Mixtures (Flow-Cone Method)", issued 1 Sept. 1958
- [96] vom Berg, W.: Zum Fließverhalten von Zementsuspensionen, Dissertation TH Aachen, 1982
- [97] VSL International, Datenblatt zum PT-Plus System, 1993



- [98] Wesche, K.; v. Berg, W.: Rheologische Eigenschaften von Zementleim und Frischbeton, beton 1/73
- [99] Zierep, J.: Grundzüge der Strömungslehre, Verlag Wissenschaft und Technik, G. Braun, Karlsruhe, 1990
- [100] Zimbelmann, R.: Einpreßmörtel mit langer Verarbeitungszeit, 15. Forschungskolloquium des Deutschen Ausschuß für Stahlbeton, 1984
- [101] Zimmermann, L.; Siegfried, E.; Ganz, H.R.: Injektionsversuche an Kabeln VSL 6-4 mit PE- und Stahlhüllrohren, Firmenbericht der Fa. VSL vom 29.09.1988
- [102] ZTV-K 80, Zusätzliche Technische Vorschriften für Kunstbauten, Bundesminister für Verkehr, Ausgabe 1980
- [103] ZTV-K 88, Zusätzliche Technische Vorschriften für Kunstbauten, Bundesminister für Verkehr, Ausgabe 1988
- [104] Zulassungsbescheid für Dywidag-Spannverfahren, Bayrisches Staatsministerium des Inneren, 1963
- [105] Zulassungsbescheid für Vorspann-Technik-Spannverfahren, Nordrhein-Westfalen, 1963



# Anlagen

zu

Kapitel 4: A-4

Kapitel 6: A-6

Kapitel 7: A-7

Kapitel 8: A-8

## Anlagenverzeichnis:      Kapitel 4

A-4.1	Tab.:	naß-chemische Zementanalyse
A-4.2	Tab.:	Zementanalyse mit RFA
A-4.3	Tab.:	Wasseranspruch, Blainewerte, Wärmeflußkalorimetrie, Zementunter- suchung nach DIN 1164, ergänzende Untersuchung
A-4.4	Tab.:	Ergebnisse der Eignungsprüfung
A-4.5	Bilder:	Tauchzeiten für Mörtel der Standardrezeptur
A-4.6	Bilder:	Auslaufzeiten mit 10 mm Trichter für Mörtel der Standardrezeptur
A-4.7	Bilder:	Vergleich naß-chemische Analyse und RFA
A-4.8	Bilder:	Korngrößenverteilung, naß und trocken Dispergierung
A-4.9	Bilder:	Vergleich der Korngrößenverteilung unterschiedlicher Zemente, naß- dispergiert
A-4.10	Bilder:	Vergleich der Korngrößenverteilung unterschiedlicher Zemente, trocken-dispergiert
A-4.11	Bilder:	Einfluß von FM auf die Tauchzeit
A-4.12	Tab.:	Porenvolumina
A-4.13	Tab.:	Ausgepreßte Wassermenge

Tab. A-4.1 Chemische Analyse und Klinkerzusammensetzung der untersuchten Zemente - naß chemische Analyse

Zement	Z 1	Z 2	Z 3	Z 4	Z 5	Z 6	Z 7	Z 8	Z 9	Z 10	Z 11	Z 12	Z 13	Z 14
SiO <sub>2</sub>	21,65	19,84	19,65	19,74	21,18	22,38	21,85	18,81	19,61	20,48	19,32	19,82	22,52	21,84
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,65	5,1	5,17	4,16	4,84	5,13	5,2	6,1	5,86	3,36	5,03	5,31	4,84	4,38
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,42	3,17	2,97	3,01	2,77	1,97	2,02	3,25	2,66	6,61	2,88	3,35	2,74	4,03
CaO	66,37	65,92	63,31	62,58	65,69	64,95	64,78	62,19	63,83	62,98	63,17	63,77	63,85	61,18
SO <sub>3</sub>	2,64	2,73	3,21	3,2	2,99	2,51	2,99	3,64	2,57	2,08	2,98	3,01	2,74	3,57
K <sub>2</sub> O	0,51	0,56	0,84	0,82	0,68	0,70	0,71	0,87	0,81	0,42	0,74	0,92	0,67	0,61
Na <sub>2</sub> O	0,19	0,10	0,09	0,15	0,35	0,25	0,26	0,17	0,15	0,10	0,13	0,19	0,23	0,26
Glühverl.	2,1	1,19	2,06	2,05	0,51	0,86	0,86	1,40	2,99	2,49	2,32	1,20	1,97	1,97
C <sub>3</sub> S	71,52	70,95	60,21	63,31	61,40	49,83	51,25	54,16	60,26	62,74	63,88	59,88	44,48	37,66
C <sub>2</sub> S	8,13	3,37	10,92	8,84	14,41	26,58	23,99	13,08	10,77	11,40	7,21	11,66	31,02	34,22
C <sub>3</sub> A	7,27	8,15	8,68	5,93	8,14	10,26	10,36	10,67	11,03	0,00	8,46	8,41	8,19	4,79
C <sub>4</sub> AF	4,32	9,65	9,04	9,16	8,43	6,00	6,15	9,89	8,09	20,12	8,76	10,19	8,34	12,26
Na <sub>2</sub> O-Äqui.	0,53	0,47	0,64	0,69	0,80	0,71	0,73	0,74	0,68	0,38	0,62	0,80	0,67	0,66
Tauchzeit t <sub>Ta</sub> [sec]	22,8	30,3	55,5	116,0	300,0	300,0	278,0	300,0	63,7	21,4	109,1	145,0	15,8	64,0

11/08/2015

Tab. A-4.2 Chemische Analyse und Klinkerzusammensetzung der untersuchten Zemente - RFA-Analyse

Zement	Z 1	Z 2	Z 3	Z 4	Z 5	Z 6	Z 7	Z 8	Z 9	Z 10	Z 11	Z 12	Z 13	Z 14
SiO <sub>2</sub>	22,02	20,06	20,05	19,50	21,09	22,11	22,35	19,85	19,77	20,66	19,62	19,45	22,60	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,66	5,06	5,26	4,40	5,04	5,42	5,39	6,38	5,96	3,67	5,07	5,41	5,23	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,37	3,07	2,94	2,60	2,46	1,92	1,66	3,12	2,26	6,19	3,29	3,06	1,58	
CaO	66,03	65,42	63,05	62,81	65,26	64,01	64,28	61,78	63,44	62,92	63,85	64,08	63,36	
SO <sub>3</sub>	2,74	2,75	3,27	3,25	3,05	3,01	2,56	3,64	2,56	2,11	2,99	3,05	2,72	
K <sub>2</sub> O	0,61	0,68	1,08	1,01	0,80	0,84	0,84	1,11	1,01	0,48	1,04	1,06	0,8	
Na <sub>2</sub> O	0,21	0,19	0,16	0,20	0,33	0,21	0,26	0,20	0,09	0,09	0,10	0,09	0,21	
Glühverl.														
C <sub>3</sub> S	67,04	67,59	55,38	64,90	59,26	44,75	45,88	42,89	57,39	59,56	63,48	63,58	40,97	
C <sub>2</sub> S	12,57	6,53	15,72	6,95	15,77	29,64	29,48	24,56	13,40	14,31	8,37	7,81	33,90	
C <sub>3</sub> A	7,38	8,22	8,97	7,26	9,20	11,12	11,48	11,63	11,97	0,00	7,87	9,16	11,19	
C <sub>4</sub> AF	4,17	9,34	8,95	7,91	7,49	5,84	5,05	9,49	6,88	18,84	10,01	9,31	4,81	
Na <sub>2</sub> O-Äqui.	0,61	0,64	0,87	0,86	0,86	0,76	0,81	0,93	0,75	0,41	0,78	0,79	0,74	
Tauchzeit t <sub>Ta</sub> [sec]	22,8	30,3	55,5	116,0	300,0	300,0	278,0	300,0	63,7	21,4	109,1	145,0	15,8	

Tab. A-4.3 Wasseranspruch, Blainewerte, Wärmeflußkalorimetrie und ergänzende Untersuchungen

	Z 1	Z 2	Z 3	Z 4	Z 5	Z 6	Z 7	Z 8	Z 9	Z 10	Z 11	Z 12	Z 13
C <sub>3</sub> A Reaktivität [%]	8,9	6,0	6,0	12,3	10,0	6,6	10,9	11,7	8,7	n. b.	13	5,8	5,2
SO <sub>3</sub>	2,74	2,75	3,27	3,25	3,05	3,01	2,56	3,64	2,56	2,11	2,99	3,05	2,72
<b>Sulfatphasen</b>													
Gips [%]	0	5	0	< 1	< 1	10	< 1	1	0	89	0	0,1	3
Halbhydrat [%]	8	17	18	26	21	5	35	67	99	11	31	33	12
Anhydrit [%]	92	78	82	74	79	85	64	33	< 1	0	68	66	86
<b>Korngrößen</b>													
Blaine-Werte [cm <sup>2</sup> /g]	3290	3470	3740	4390	3770	3460	3810	4560	3940	3760	3600	3680	2960
	Lasergranulometer; trocken dispergiert:												
spezifische Oberfläche [cm <sup>2</sup> /g]	5650	5170	5480	6380	5500	5100	5650	6150	5360	4710	5910	4660	5230
x' [µm]	11,49	10,85	9,51	7,66	9,58	10,47	9,28	8,14	11,79	11,62	10,87	12,77	11,22
	Lasergranulometer; naß dispergiert:												
spezifische Oberfläche [cm <sup>2</sup> /g]	3160	3040	3520	3590	2620	3100	3100	3550	3310	3700	5350	4500	3750
x' [µm]	17,40	15,48	13,19	11,03	14,90	15,51	15,47	12,25	15,30	11,27	11,49	12,15	19,73
<b>DIN</b>													
Wasserbedarf [%]	25,8	27,2	29,0	28,4	30,1	27,8	28,7	29,4	27,8	26,9	28,7	28,5	25,2
Erst.-Anfang [min]	148	128	140	122	173	121	142	135	105	225	123	124	152
Erst.-Ende [min]	203	171	200	179	243	185	201	185	173	285	162	185	213
Ausbreitmaß [mm]	20,5	20,3	20,7	20,6	19,9	20,1	20,4	19,7	18,8	21,2	20,7	20,4	17,8
<b>Wärmeflußkalorimetrie</b>													
1. Maximum [min]	0,8	0,9	0,7	1,0	0,7	1,6	1,0	1,3	0,8	1,8	1,8	1,6	0,9
Wärmefluß[mW/g]	106,7	87,3	83,6	96,5	101,2	54,9	91,5	60,5	111,4	10,5	68,7	87,4	53,4
2. Maximum [h]	10,5	11,0	10,5	9,7	10,5	10,3	9,5	10,0	11,2	15,3	9,8	9,5	9,5
Wärmefluß[mW/g]	2,6	3,2	3,5	3,7	3,7	3,0	3,8	5,4	2,6	2,5	3,8	3,8	2,5
Hydratationswärme nach 30 min [J/g]	18,1	16,0	19,3	21,2	28,0	14,9	21,2	19,7	22,6	4,2	22,9	23,8	12,0
w/z	0,38	0,38	0,405	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,4	0,365	0,42	0,42	0,405
Tauchz. T=0 min [s]	18	35	40	49	32	12	19	56	34	28	30	29	9
Tauchz. T=30 min [s]	21	74	67	83	57	24	25	91	56	133	62	63	12
w/z			0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38					0,38
Tauchz. T=0 min [s]			55	> 300	> 300	> 300	278	> 300					16
Tauchz. T=30 min [s]			102				23,7						40

D:\V-int. Doc

Zement	W/Z	Zusatzmittel		Zusatzmittel/ Zusatzstoff		Mischer	T [°C]	10 mm-Trichter			Tauchen			ΔV [%]	ΔV <sub>W</sub> [%]	f <sub>c,28</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]
								t <sub>Tr</sub> [sec]				t <sub>Ta</sub> [sec]				
		Art	[M.-%]	Art	[M.-%]			0 min	30 min	60 min	0 min	30 min	60 min			
Standardrezeptur																
Z 1	0,38	EH 1	1,0	-	-	O	21,8	10,0	11,7	12,5	22,8	58,0	79,3	+ 2,06	0,63	41,3
Z 1	0,38	EH 1	1,0	-	-	O	22,4	10,1	12,7	13,4	20,3	42,8	51,9	+ 1,58	2,05	59,3
Z 2	0,38	EH 1	1,0	-	-	O	22,0	11,8	15,1	14,5	30,3	76,3	75,5	+ 3,67	0,94	65,1
Z 2	0,38	EH 1	1,0	-	-	O	22,6	12,5	16,5	18,1	28,0	45,0	62,5	+ 3,68	1,79,	60,9
Z 2	0,38	EH 1	1,0	-	-	O	24,1	10,7	12,8	13,7	25,5	51,6	68,6	+ 3,16	1,79	57,0
Z 2	0,38	EH 1	1,0	-	-	O	24,0	12,6	19,4	16,9	40,3	98,8	89,2	+ 4,20	1,18	72,7
Z 3	0,38	EH 1	1,0	-	-	O	24,6	15,5	23,9	23,3	74,9	123,0	142,4	+ 3,68	0,78	62,9
Z 3	0,38	EH 1	1,0	-	-	O	22,9	17,5	24,6	-	55,5	101,8	-	+ 2,10	1,33	54,0
Z 4	0,38	EH 1	1,0	-	-	O	23,9	15,6	25,0	33,5	116,0	-	179,0	-	-	40,9
Z 5	0,38	EH 1	1,0	-	-	O	24,2	69,0	-	-	300,0	-	-	+ 4,21	0,17	38,3
Z 6	0,38	EH 1	1,0	-	-	O	27,2	-	-	-	300,0	-	-	-	-	36,6
Z 7	0,38	EH 1	1,0	-	-	O	23,3	16,0	21,0	21,0	278,0	278,0	290,0	+ 4,19	0,29	32,9
Z 8	0,38	EH 1	1,0	-	-	O	28,2	60,2	270,0	-	300,0	-	-	+ 3,40	0,19	53,4
Z 9	0,38	EH 1	1,0	-	-	O	24,9	13,2	19,2	20,5	54,6	110,0	125,3	+ 4,21	1,05	45,0
Z 9	0,38	EH 1	1,0	-	-	O	19,4	21,3	17,1	-	63,7	94,3	-	+ 4,21	0,99	44,4
Z 10	0,38	EH 1	1,0	-	-	O	21,2	10,6	13,2	14,9	21,4	64,1	94,3	-	-	-
Z 10	0,38	EH 1	1,0	-	-	O	19,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Z 11	0,38	EH 1	1,0	-	-	O	25,4	17,9	25,1	24,8	109,1	-	240,5	+ 4,21	0,32	35,9

Anlage A-4.4: Ergebnisse der Eignungsprüfungen

Blatt 1

E 111-742.00



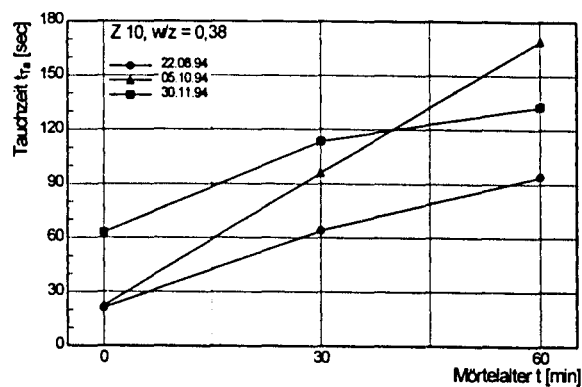
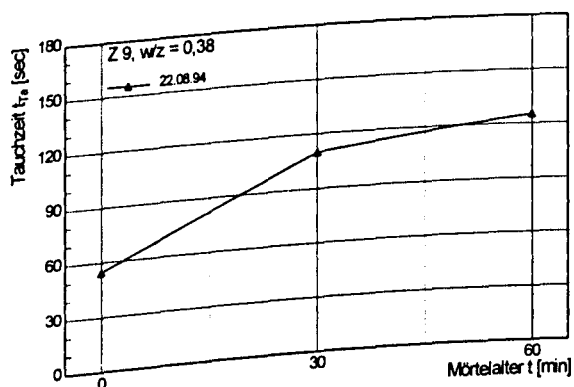
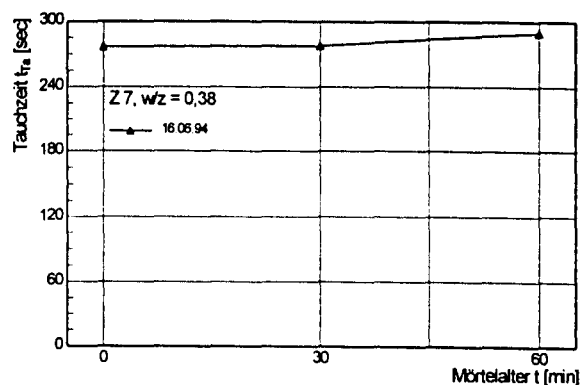
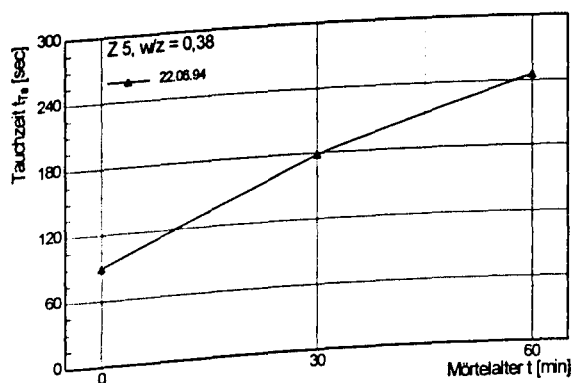
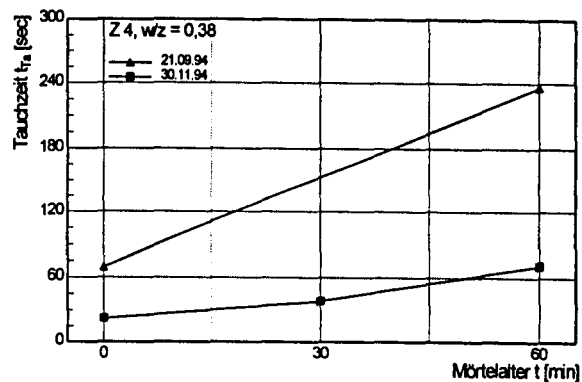
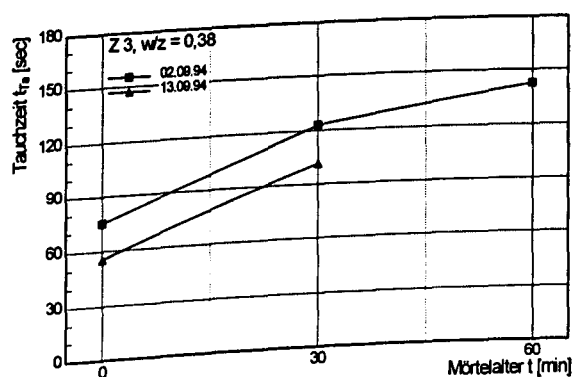
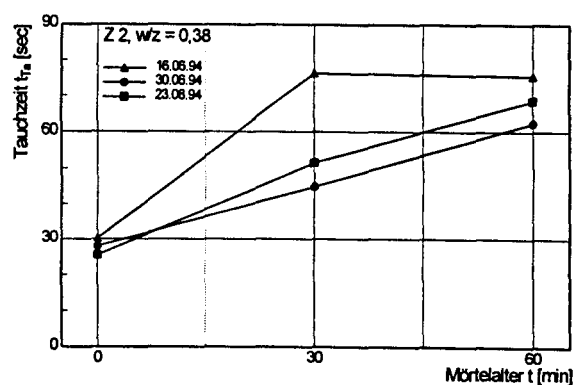
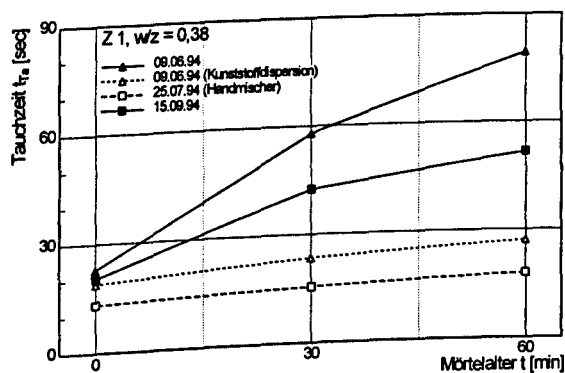
Z 12	0,38	EH 1	1,0	-	-	O	23,6	16,5	35,8	-	80,3	244,3	-	+ 3,68	0,74	-
Z 12	0,38	EH 1	1,0	-	-	O	24,3	20,8	106,3	-	145,0	394,8	-	+ 3,16	0,55	41,8
Z 13	0,38	EH 1	1,0	-	-	O	-	9,6	11,5	11,7	15,8	39,8	49,5	-	-	
Z 14	0,38	EH 1	1,0	-	-	O	23,1	17,2	30,0	35,5	64,0	104,0	132,5	+ 3,68	1,05	59,0

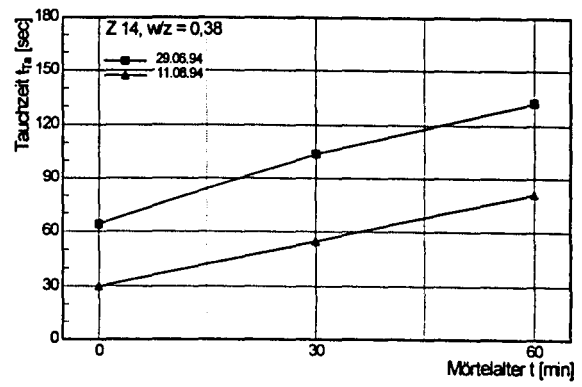
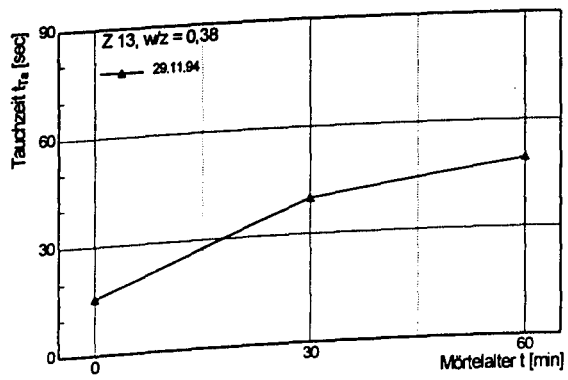
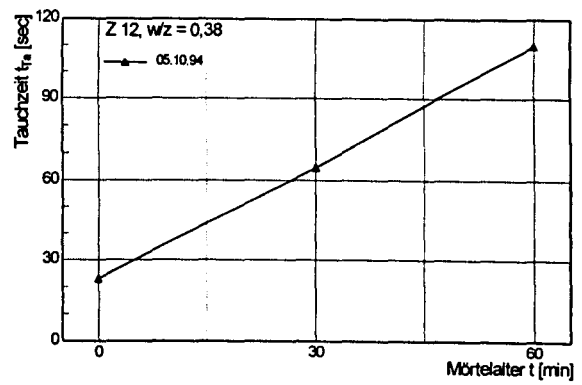
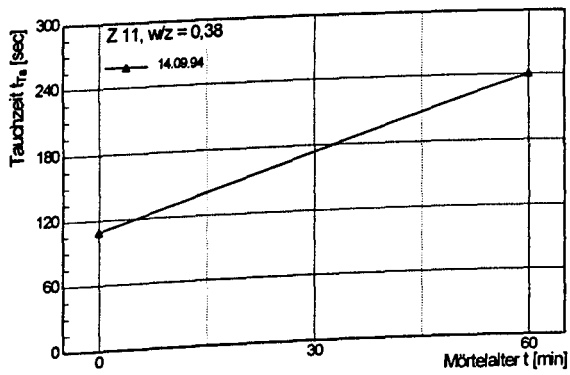
Zement	W/Z	Zusatzmittel		Zusatzmittel/ Zusatzstoff		Mischer	T [°C]	10 mm-Trichter t <sub>Tr</sub> [sec]			Tauchen t <sub>Ta</sub> [sec]			ΔV [%]	ΔV <sub>w</sub> [%]	f <sub>c,28</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]
		Art	[M.-%]	Art	[M.-%]			0 min	30 min	60 min	0 min	30 min	60 min			
Verschiedene Variationen																
Z 2	0,40	EH 2	1,0	-	-	O	20,5	12,5	24,5	31,9	43,3	234,0	261,0	+ 2,11	1,01	52,3
Z 3	0,38	EH 2	1,0	-	-	O	20,3	17,6	-	-	198,0	-	-	+ 2,11	0,63	49,8
Z 4	0,42	EH 2	1,0	-	-	O	20,4	12,4	13,8	15,6	55,6	112,5	165,6	+ 2,10	1,08	39,8
Z 4	0,38	EH 2	1,0	FM	1,0	O	19,8	9,7	-	-	17,5	-	-	+ 2,63	0,17	42,3
Z 4	0,38	EH 3	1,0	FM	0,3	O	20,2	19,3	-	-	116,0	150,0	-	+ 22,0	0,00	-
FM																
Z 4	0,38	EH 1	1,0	FM	0,5	O	23,7	12,6	-	30,4	69,3	-	236,6	+ 4,21	2,10	36,7
Z 5	0,38	EH 1	1,5	-	-	O	27,5	16,0	25,5	33,5	90,0	179,0	246,0	+ 2,78	0,18	34,8
Z 6	0,38	EH 1	2,0	FM	0,6	O	31,1	9,0	11,0	11,5	22,0	86,5	107,0	-	-	-
Z 7	0,38	EH 1	1,0	FM	0,5	O	20,0	16,0	-	-	76,9	-	-	+ 4,21	-	-
Z 9	0,38	EH 1	1,0	FM	0,5	O	21,4	13,4	-	18,5	28,1	-	80,5	+ 3,16	0,29	46,7
Z 11	0,40	EH 1	1,0	-	-	O	21,0	8,6	9,7	9,9	16,9	31,4	37,9	+ 4,21	0,61	-
Z 11	0,40	EH 1	1,0	FM	1,0	O	20,9	8,6	9,0	9,4	12,0	14,4	17,1	+ 4,73	1,05	-
Z 12	0,38	EH 1	1,0	FM	0,5	O	23,7	12,0	14,9	16,5	23,0	64,9	110,0	+ 2,95	0,46	41,0
Z 14	0,38	EH 1	1,0	FM	0,5	H	21,7	16,3	20,9	27,0	30,1	54,8	81,0	+ 3,68	-	-

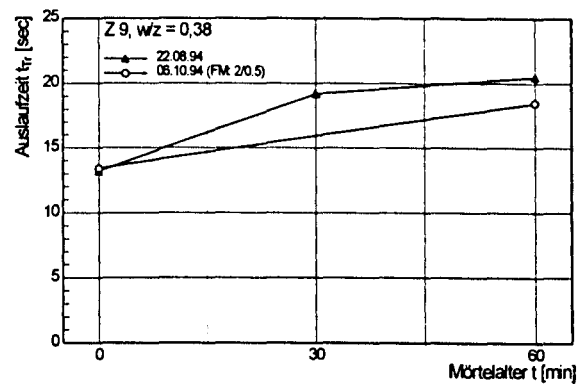
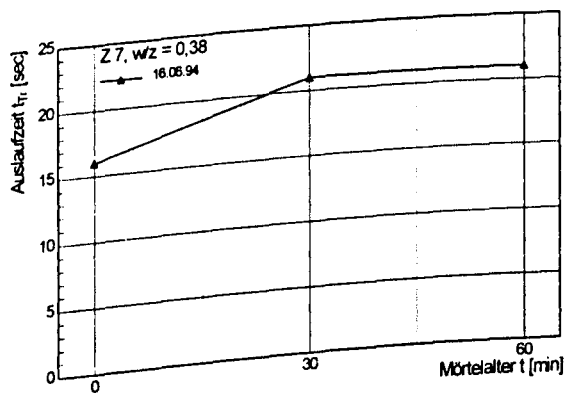
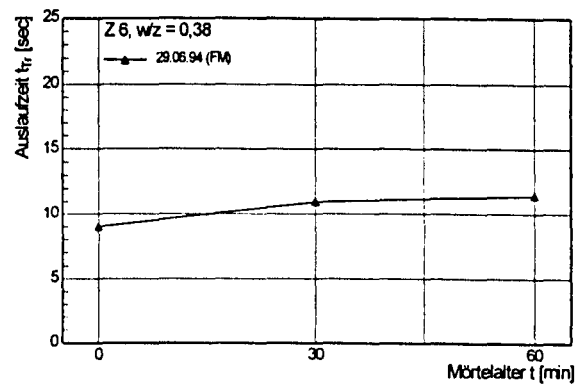
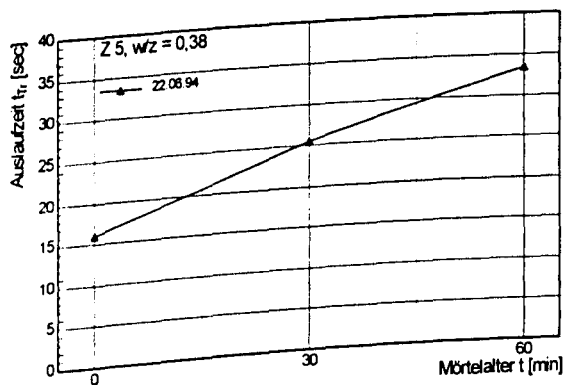
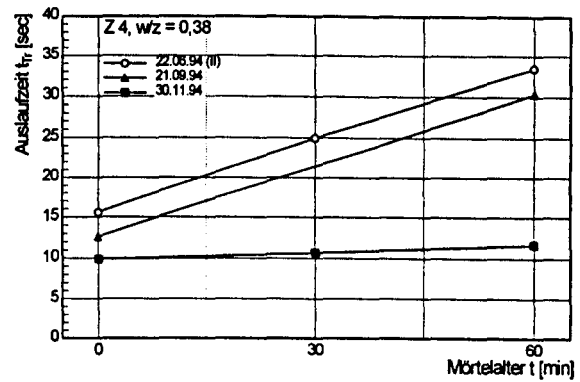
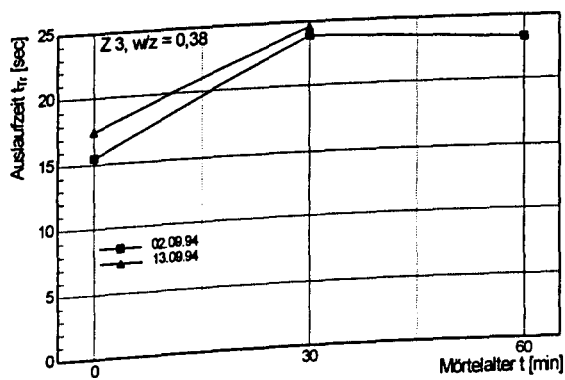
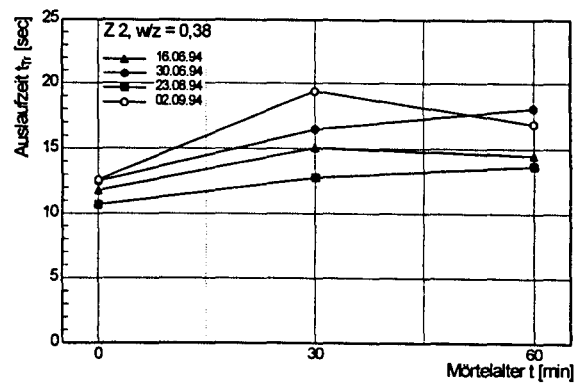
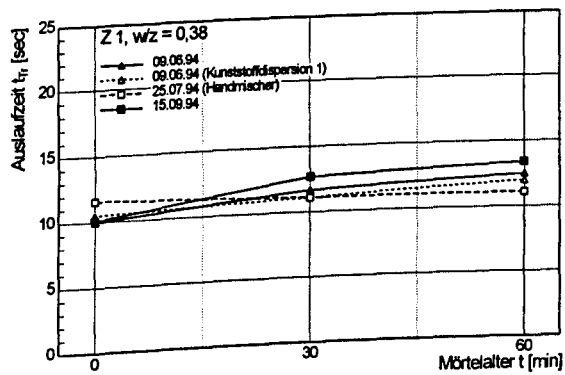
Zement	W/Z	Zusatzmittel		Zusatzmittel/ Zusatzstoff		Mischer	T [°C]	10 mm-Trichter t <sub>Tr</sub> [sec]			Tauchen t <sub>Ta</sub> [sec]			ΔV [%]	ΔV <sub>w</sub> [%]	f <sub>c,28</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]
		Art	[M.-%]	Art	[M.-%]			0 min	30 min	60 min	0 min	30 min	60 min			
<b>MS</b>																
Z 1	0,38	EH 1	1,0	-	-	O	20,1	10,0	10,1	10,5	16,4	29,4	33,0	+ 0,53	2,11	-
Z 1	0,38	EH 1	1,0	MS	1,0	O	19,8	9,0	9,4	10,1	17,5	26,7	35,6	+ 2,11	1,31	52,6
Z 1	0,38	EH 1	1,0	MS	5,0	O	19,5	12,5	14,8	-	262,7	311,0	-	+ 3,59	0,31	46,7
Z 9	0,42	EH 1	1,0	MS	1,0	O	21,3	9,7	11,7	12,5	32,1	97,0	139,2	-	-	-
Z 9	0,42	EH 1	1,0	MS	5,0	O	21,0	-	-	-	> 300,0	-	-	-	-	-
Z 10	0,38	EH 1	1,0	-	-	O	19,8	11,2	-	99,0	25,4	-	260,0	2,11	1,92	-
Z 10	0,38	EH 1	1,0	MS	5,0	O	20,1	11,9	> 60,0	-	245,0	> 300,0	-	1,89	1,16	-
Z 11	0,40	EH 1	1,0	-	-	O	19,4	11,2	-	-	25,5	-	-	-	-	36,5
Z 11	0,40	EH 1	1,0	MS	5,0	O	19,6	11,9	-	-	180,0	-	-	+ 1,89	1,16	32,5
Z 13	0,40	EH 1	1,0	-	-	O	20,1	7,9	8,2	8,4	8,3	10,2	11,4	+ 3,15	1,89	-
Z 13	0,40	EH 1	1,0	MS	1,0	O	20,3	7,9	8,3	8,7	10,5	10,3	15,0	+ 4,21	1,05	-
Z 13	0,40	EH 1	1,0	MS	5,0	O	20,1	8,7	9,1	9,4	22,2	37,8	53,7	+ 4,21	0,17	-
<b>Kunststoffdispersion</b>																
Z 1	0,38	EH 1	1,0	Ku	1,0	O	20,0	10,5	11,1	12,0	18,9	23,3	27,0	+ 4,17	0,14	54,2
Z 1	0,33	EH 1	1,0	Ku	1,0	S	21,0	-	-	-	21,5	28,3	-	+ 3,20	0,47	41,3
Z 1	0,35	EH 1	1,0	Ku	1,0	H	18,5	-	-	-	27,5	36,2	-	+ 5,26	0,11	58,5

Zement	W/Z	Zusatzmittel		Zusatzmittel/ Zusatzstoff		Mischer	T [°C]	10 mm-Trichter t <sub>Tr</sub> [sec]			Tauchen t <sub>Ta</sub> [sec]			ΔV [%]	ΔV <sub>w</sub> [%]	f <sub>c,28</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]
		Art	[M.-%]	Art	[M.-%]			0 min	30 min	60 min	0 min	30 min	60 min			
<b>Swibo-Mischer</b>																
Z 1	0,33	EH 1	0,5	-	-	S	18,5	15,9	-	-	66,1	112,0	-	0,0	0,73	79,9
Z 1	0,38	EH 1	1,0	-	-	S	8,0	12,1	16,1	17,0	52,3	191,7	233,4	+ 0,52	1,20	35,4
Z 2	0,38	EH 1	1,0	-	-	S	12,6	16,2	-	-	151,8	229,0	-	+ 1,04	0,71	39,8
Z 3	0,38	EH 1	1,0	-	-	S	12,2	50,0	-	-	> 300,0	-	-	+ 2,63	0,31	39,6
Z 4	0,38	EH 1	1,0	-	-	S	12,5	> 60,0	-	-	-	-	-	+ 2,10	0,19	32,0
Z 4	0,40	EH 1	1,0	-	-	S	12,4	16,3	-	-	268,0	-	-	+ 1,02	0,39	35,6
Z 7	0,38	EH 1	1,0	-	-	S	15,0	15,5	39,0	-	59,9	217,0	-	+ 1,57	0,92	38,0
Z 9	0,38	EH 1	1,0	-	-	S	13,4	46,0	-	-	295,0	-	-	-	-	-
Z 10	0,38	EH 1	1,0	-	-	S	12,5	10,7	17,6	-	22,4	47,0	-	-	-	-
Z 11	0,38	EH 1	1,0	-	-	S	14,7	15,3	-	-	171,0	-	-	-	-	-
Z 12	0,38	EH 1	1,0	-	-	S	12,6	> 60,0	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Temperatur</b>																
Z 1	0,38	EH 1	1,0	-	-	O	13,0	10,0	10,1	10,5	15,2	19,2	21,1	- 0,84	1,72	-
Z 1	0,38	EH 1	1,0	-	-	O	20,5	9,5	12,1	13,0	16,8	59,5	104,9	+ 2,90	1,10	-
Z 1	0,38	EH 1	1,0	-	-	O	30,5	9,4	11,5	12,9	26,2	88,7	135,7	+ 5,00	0,60	-
Z 9	0,40	EH 1	1,0	-	-	O	12,4	12,1	14,2	17,2	36,2	91,9	169,6	+ 0,20	0,55	-
Z 9	0,40	EH 1	1,0	-	-	O	22,3	12,7	26,8	34,9	55,9	240,0	329,3	+ 5,00	0,30	-
Z 9	0,40	EH 1	1,0	-	-	O	31,4	60,0	-	-	249,4	347,1	-	+ 6,30	0,03	-

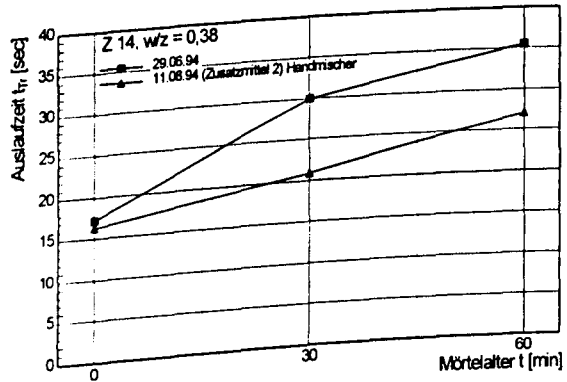
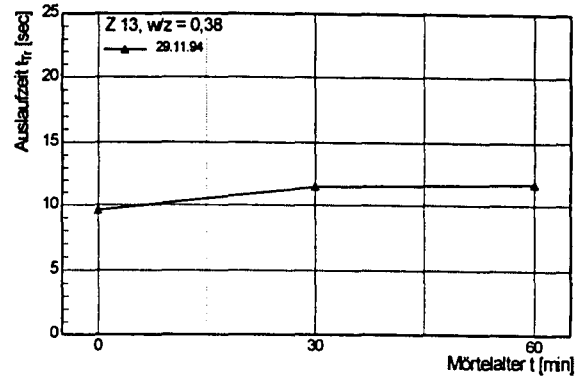
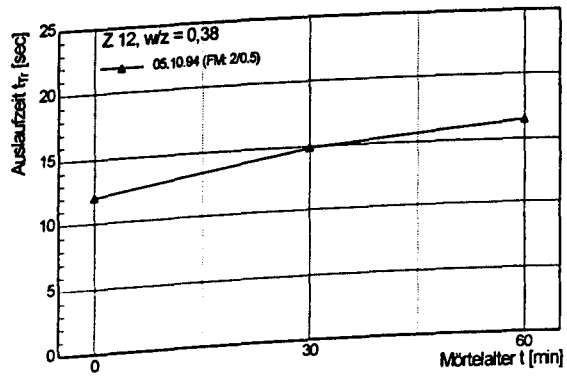
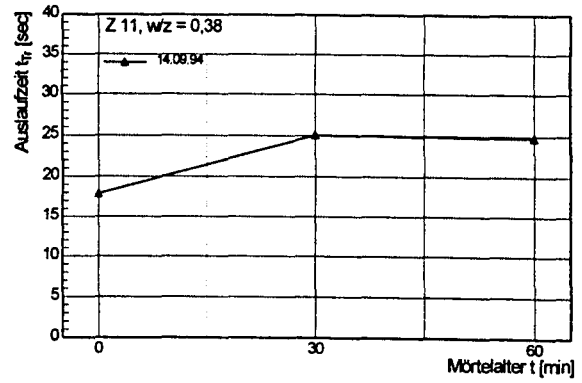
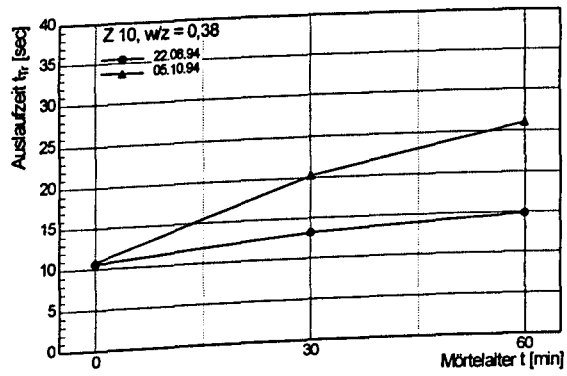
Z 9	0,40	EH 4	1,0	-	-	O	11,5	11,5	14,6	-	37,5	106,2	208,5	+ 1,25	0,55	-
Z 9	0,40	EH 4	1,0	-	-	O	21,8	10,9	25	41,8	73,3	221,5	325,0	+ 7,26	0,33	-
Z 11	0,42	EH 1	1,0	-	-	O	13,0	9,9	11,5	12,6	20,1	52,8	88,0	+ 0,30	0,44	-
Z 11	0,42	EH 1	1,0	-	-	O	21,8	11,0	12,6	13,1	56,5	82,7	104,0	+ 2,10	0,50	-
Z 11	0,42	EH 1	1,0	-	-	O	30,3	12,3	19,9	24,5	95,2	153,0	180,6	+ 5,60	0,60	-
Z 12	0,44	EH 1	1,0	-	-	O	14,4	10,7	13,1	14,0	30,0	103,6	124,4	+ 0,30	0,84	-
Z 12	0,44	EH 1	1,0	-	-	O	20,7	11,0	13,7	14,2	69,0	135,0	162,5	+ 4,20	0,60	-
Z 12	0,44	EH 1	1,0	-	-	O	32,0	14,5	55,5	-	131,0	234,1	258,2	+ 3,80	0,30	-
Z 13	0,38	EH 1	1,0	-	-	O	12,0	9,1	9,2	9,1	12,1	14,1	16,0	+ 0,53	1,54	-
Z 13	0,38	EH 1	1,0	-	-	O	19,8	8,5	9,1	9,5	11,9	15,9	20,1	+ 3,20	1,40	-
Z 13	0,38	EH 1	1,0	-	-	O	30,9	8,8	10,0	11,1	14,3	35,1	44,4	+ 6,10	0,30	
Mikrozement																
	0,85	-	-	fertig konfektioniert		-	34,0	6,2	7,0	7,8	7,5	8,1	8,1	+ 0,32	0,05	24,7
						Auslaufzeiten Marsh-Trichter t <sub>MT</sub> [sec]:					43,8	47,8	50,3			

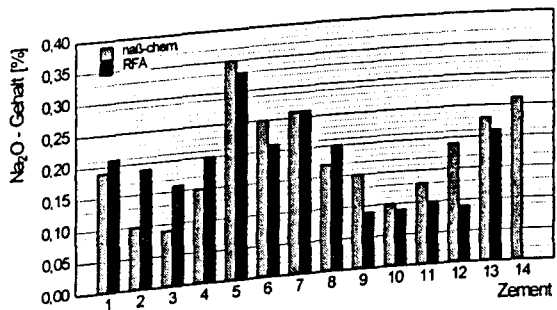
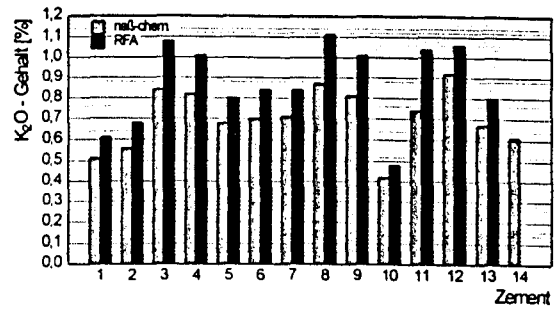
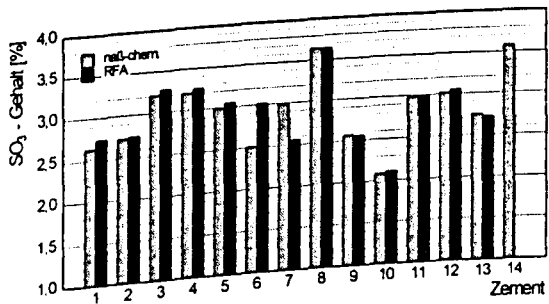
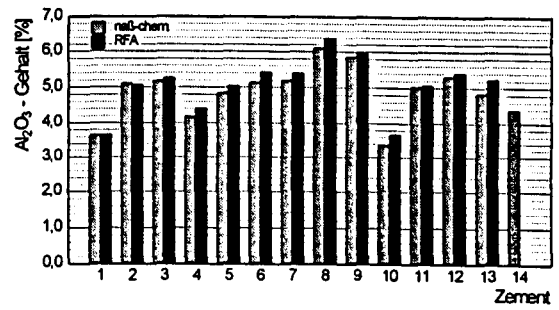
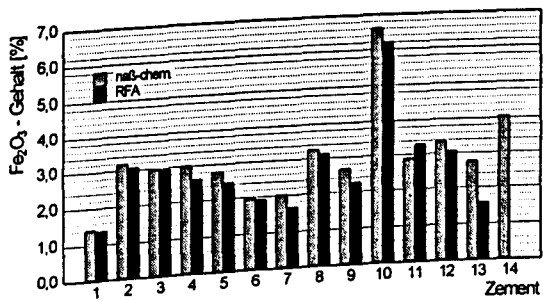
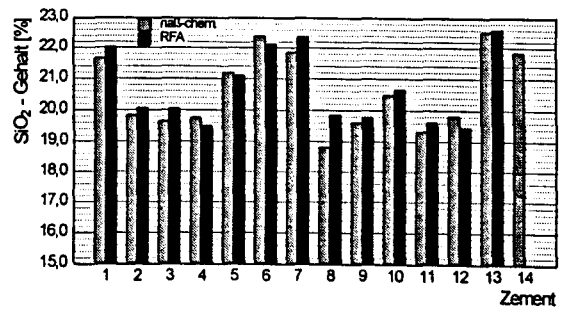
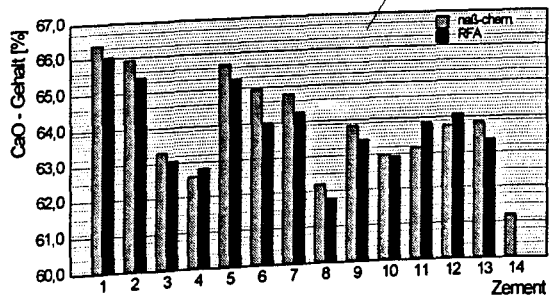




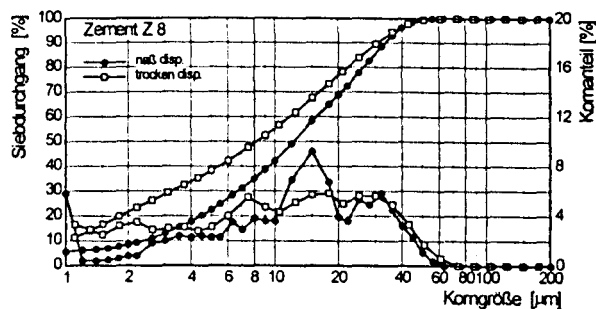
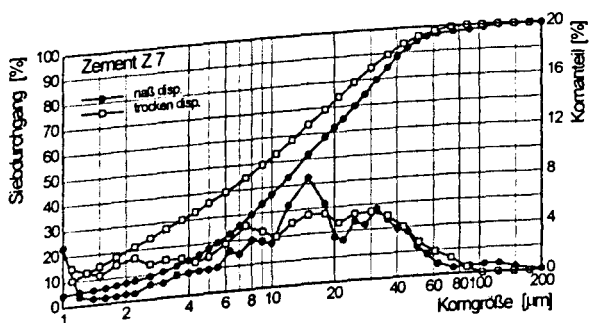
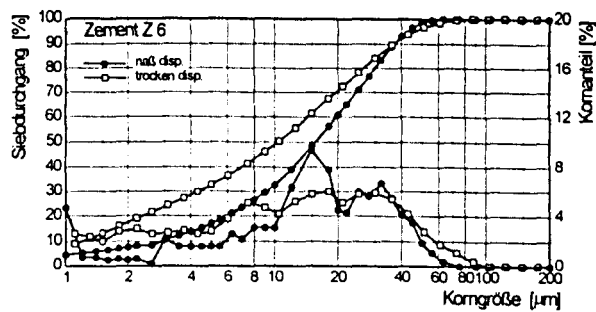
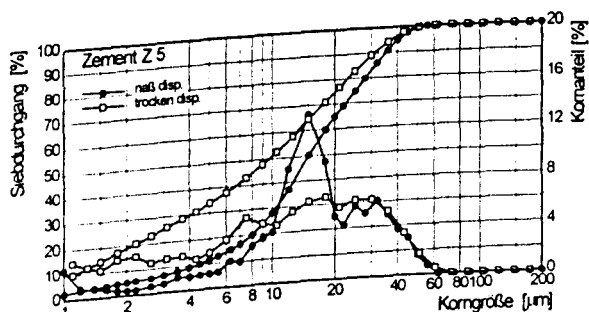
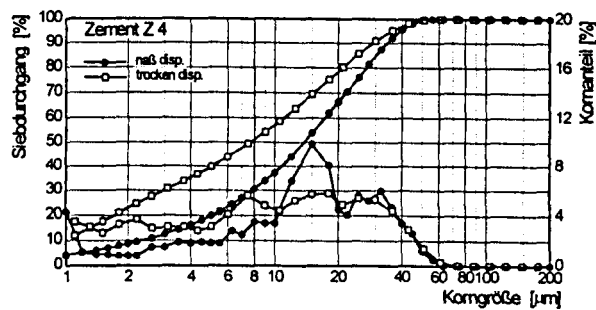
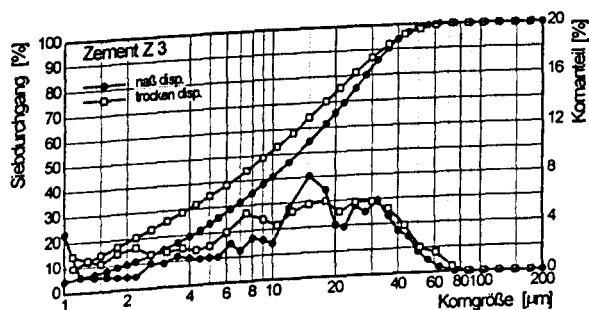
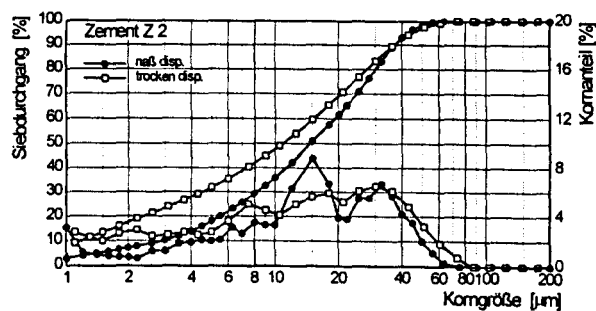
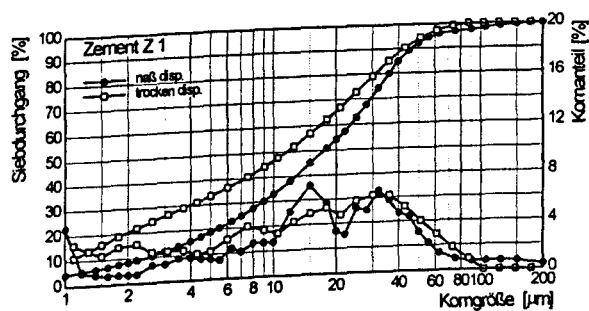


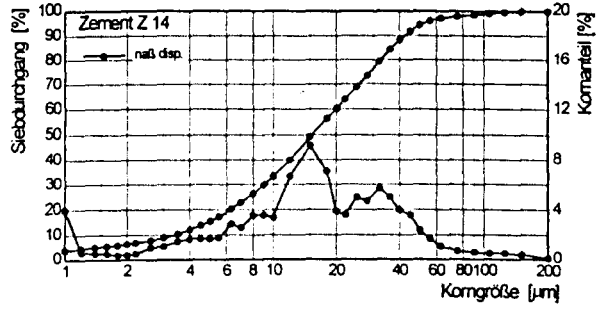
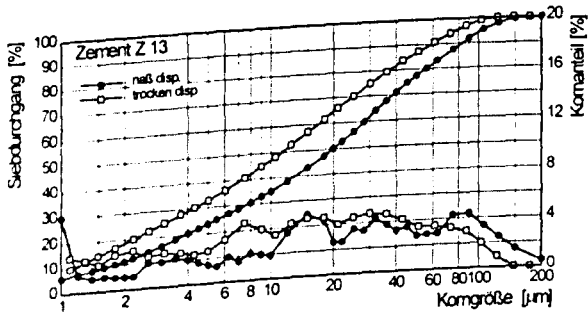
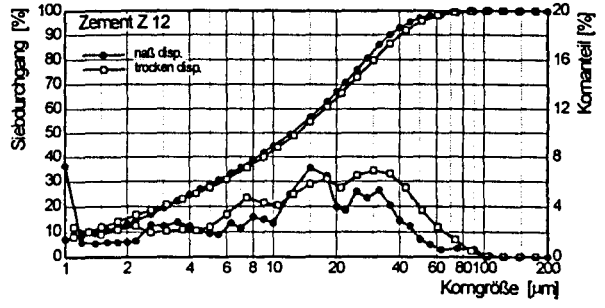
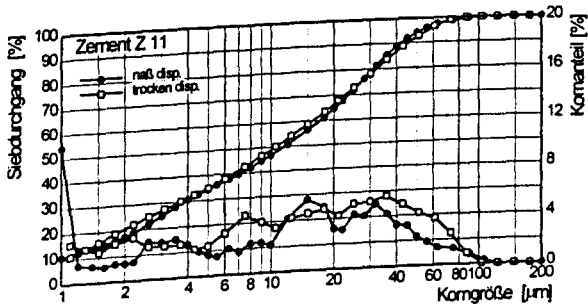
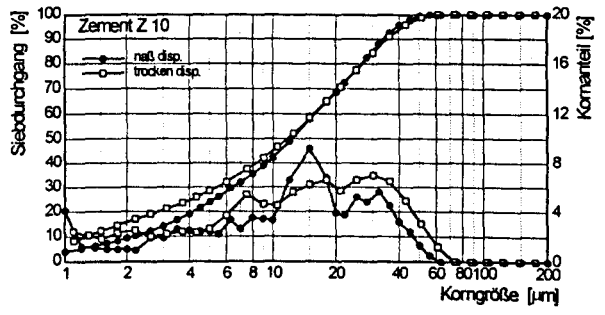
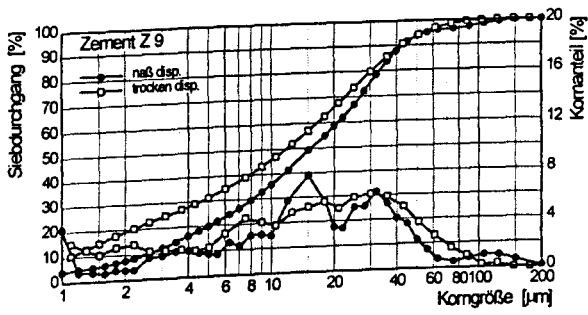


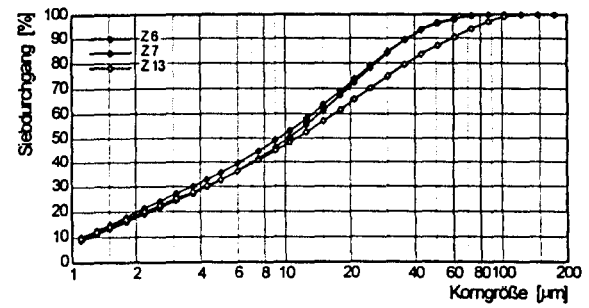
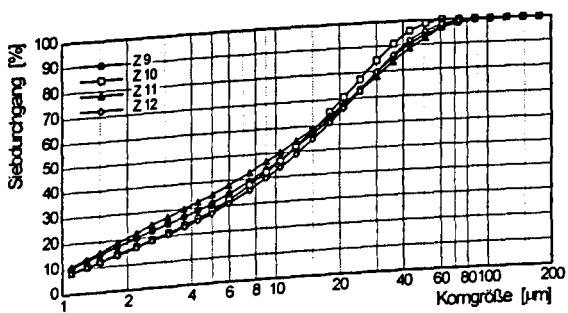
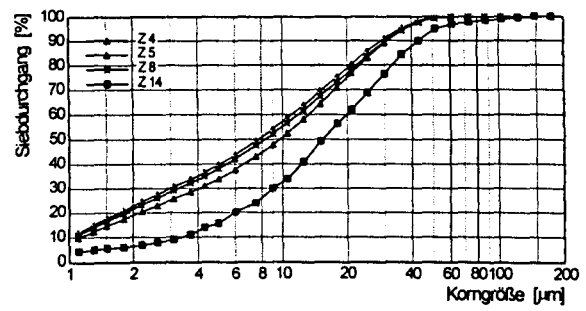
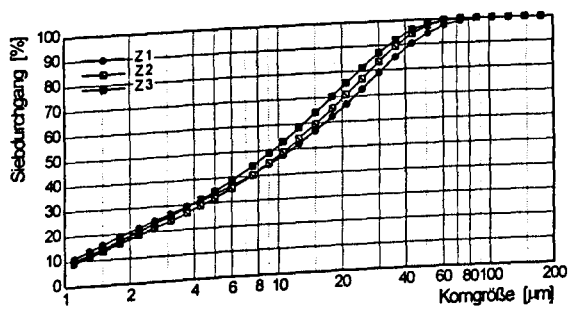


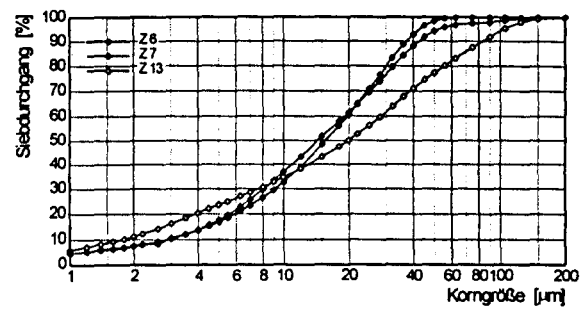
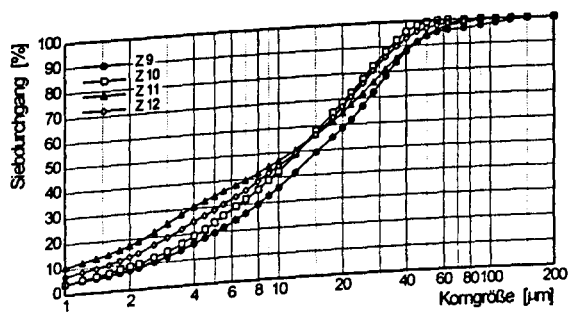
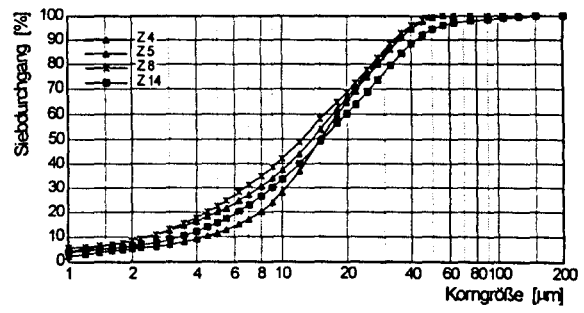
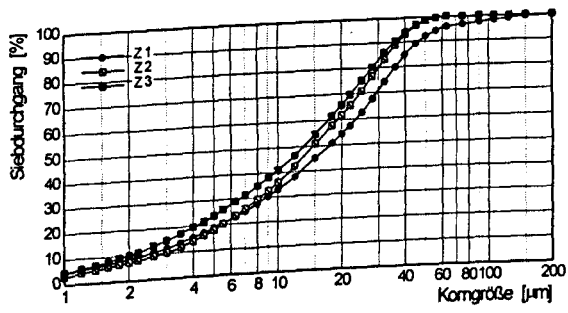


linien raus

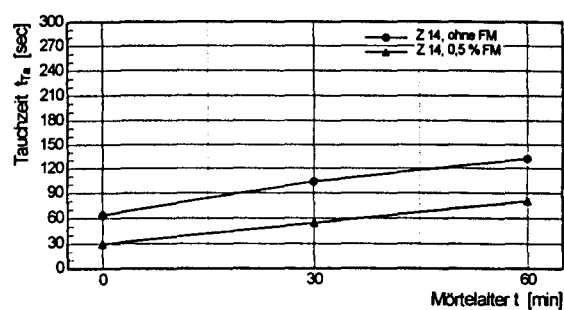
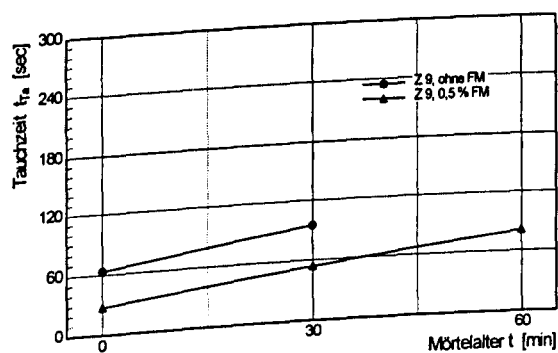
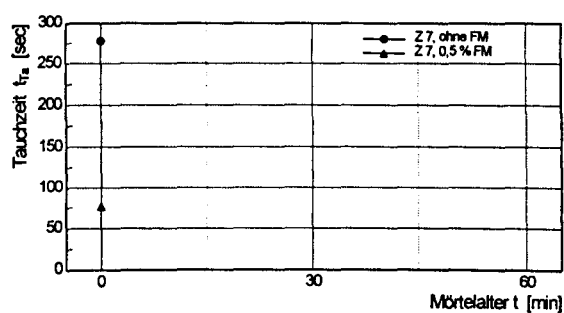
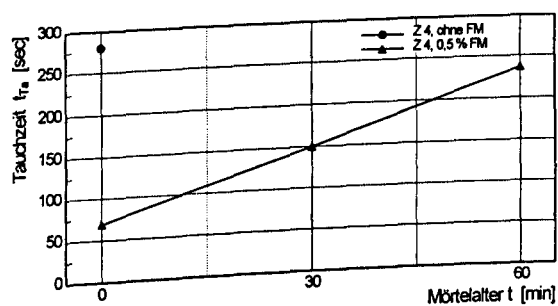








A-4.10



Tab. A-4.12: Ergebnisse der Porosimetrieuntersuchungen mit dem Quecksilberdruckporosimeter

Zement	EH	Porenvol. $V_{cum.}$ (mm <sup>3</sup> /g)	Dichte $\rho$ (g/mm <sup>3</sup> )	Porosität P (Vol.-%)	$\Delta V$ (%)	$t_{Ta}$ (sec)
Z 1	EH 1	154 138	1,63 1,64	25,15 22,65	2,06	22,8
Z 1	EH 1 + Kunststoffdi.	121 118	1,71 1,72	20,71 20,22	4,17	18,9
Z 1 (Baustelle)	EH 1 + Kunststoffdi.	73 75	1,87 1,85	13,60 13,86	3,19	35,0
Z 2	EH 1	119 115	1,70 1,70	20,20 19,50	3,67	30,3
Z 2	EH 1	110 111	1,71 1,70	18,90 18,88	3,68	28,0
Z 2	EH 1	132	1,66	21,95	3,64	41,7
Z 4	EH 1	123 124	1,71 1,71	21,13 21,11	4,12	116,0
Z 4	EH 3	234	1,41	32,93	22,0	118,0
Z 5	EH 1	100 103	1,72 1,74	17,24 17,97	4,21	90,0
Z 5	EH 1	100 98	1,77 1,75	17,76 17,13	2,78	90,0
Z 6	EH 1	107 111	1,73 1,71	18,51 18,92	3,69	300,0
Z 7	EH 1	102 101	1,68 1,71	17,24 17,29	4,19	278,0
Z 8	EH 1	113 115	1,68 1,69	18,97 19,50	5,0	300,0
Z 9	EH 1	102 103	1,76 1,75	17,91 18,10	4,21	54,6
Z 10	EH 1	115 112	1,72 1,71	19,82 19,05	3,16	21,4
Mikrozement	-	307 300	1,22 1,18	37,49 35,40	0,32	10,0



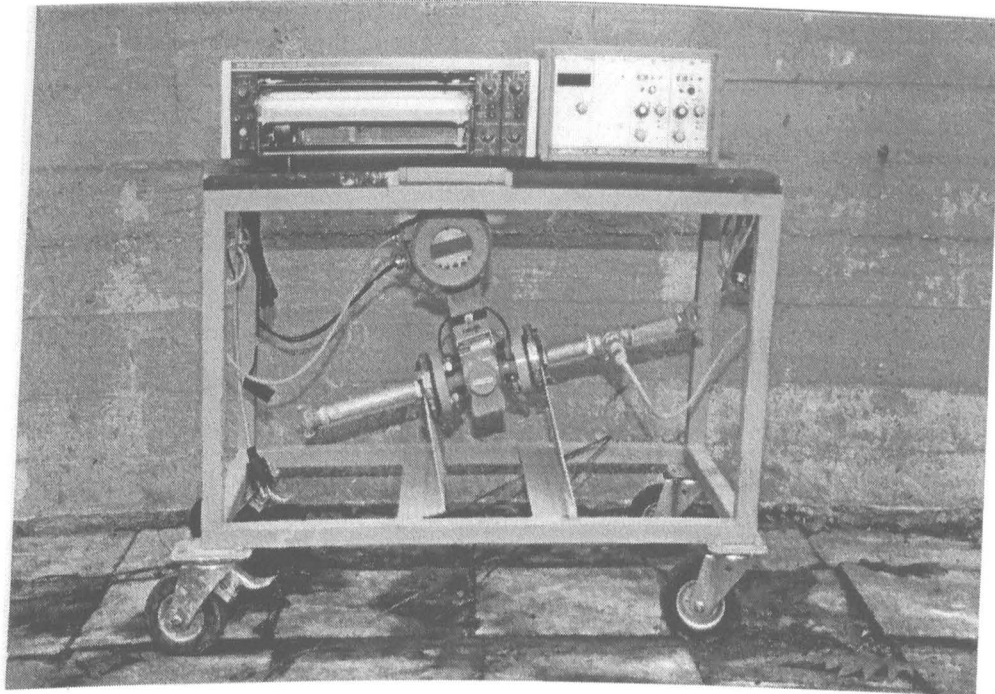
Tab. A-4.13: Ausgepreßtes Wasservolumen  $V_{W\text{-press}}$  nach  $t = 5 \text{ min}$  bei  $p = 7 \text{ bar}$

Zement	Tauchzeit nach dem Mischen $t_{Ta}$ [sec]	ausgepreßtes Wasservolumen $V_{W\text{-pres}}$ [ml]
Z 1	22,8	85
Z 2	30,3	89
Z 3	55,5	80
Z 4	280,0	60
Z 5	300,0	65
Z 6	300,0	73
Z 7	300,0	75
Z 8	300,0	63
Z 9	70,4	81
Z 10	21,4	93
Z 11	94,0	n.b.
Z 12	145,0	n.b.
Z 13	15,8	91
Z 14	64,0	76

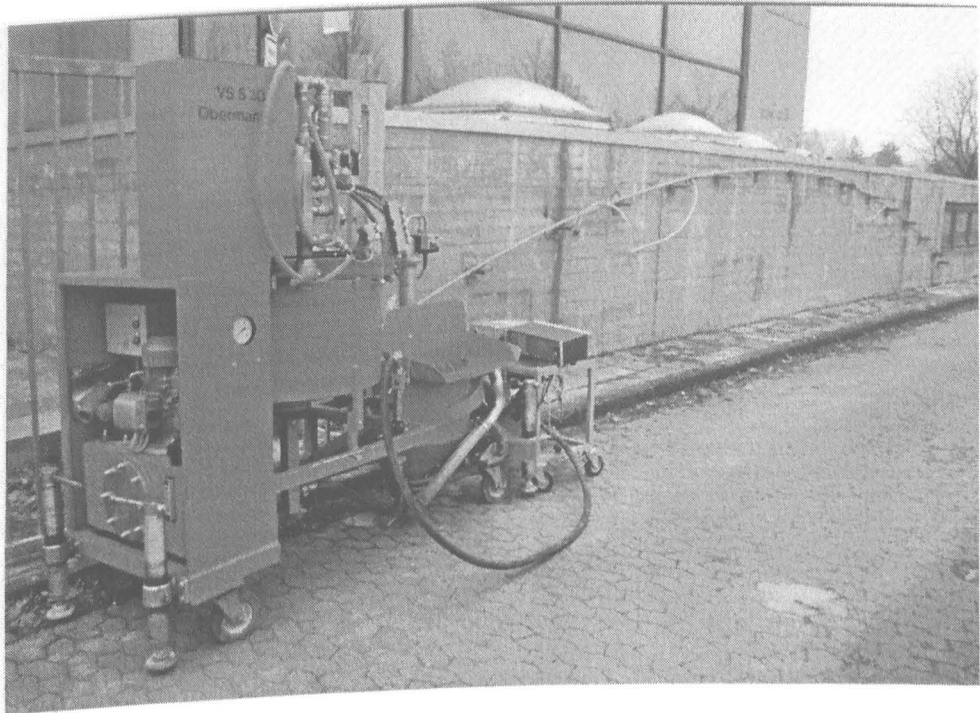
n.b. nicht bestimmt

## **Anlagenverzeichnis:      Kapitel 6**

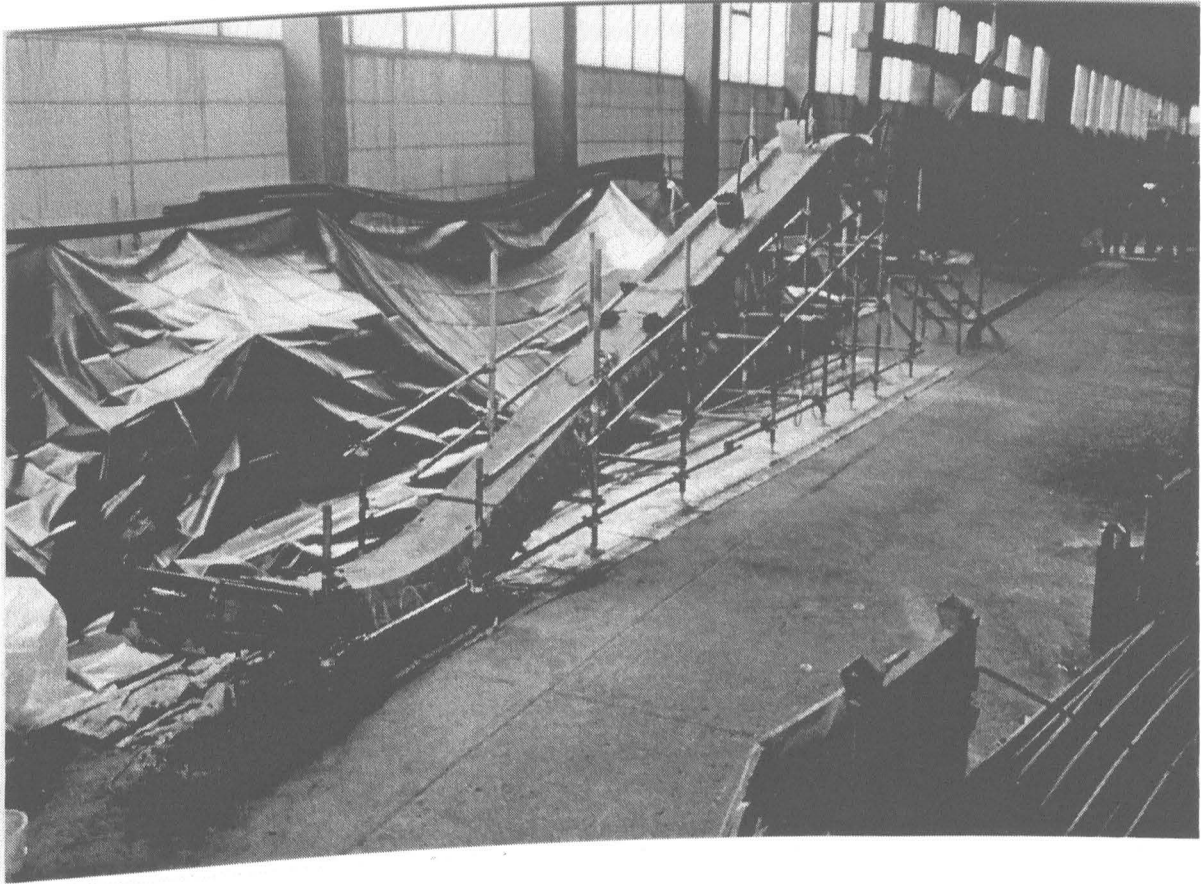
A-6.1	Foto:	Druck-Durchflußmesser
A-6.2	Foto:	Versuchsaufbau für Verpreßversuche mit Modellrohren mit einem Hochpunkt
A-6.3	Foto:	Versuchsaufbau bei dem Verpreßversuch an einem Drahtspannverfahren



A-6.1



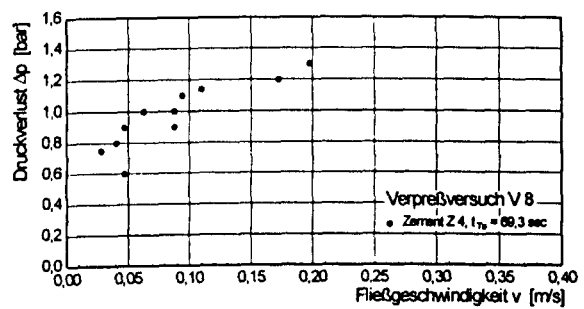
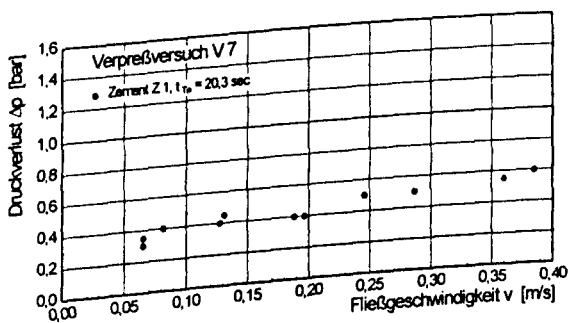
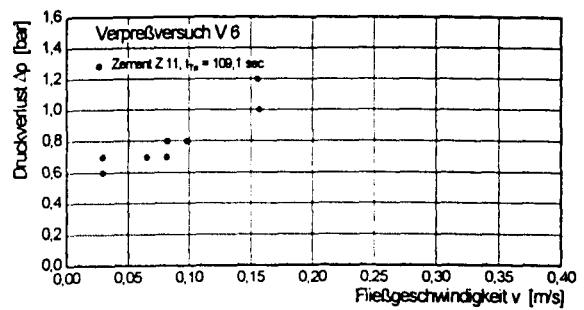
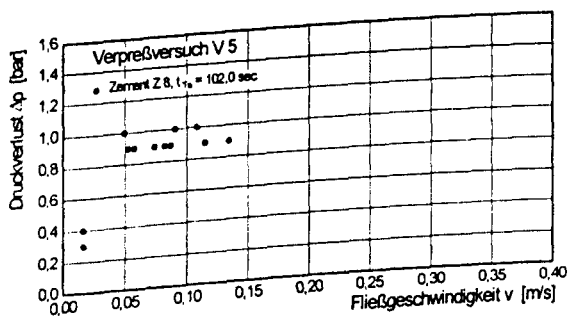
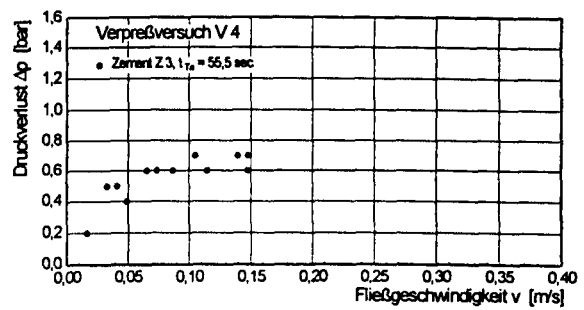
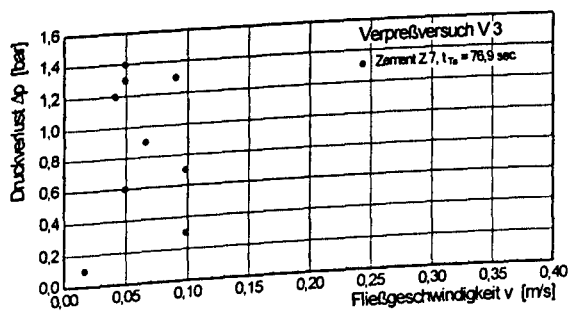
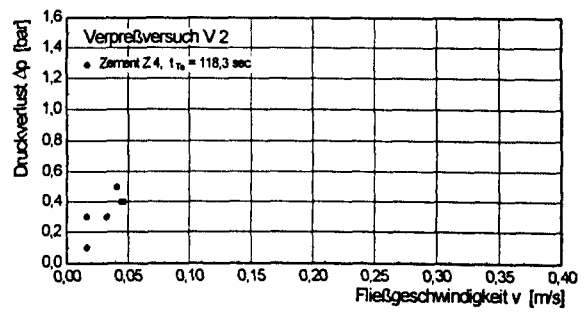
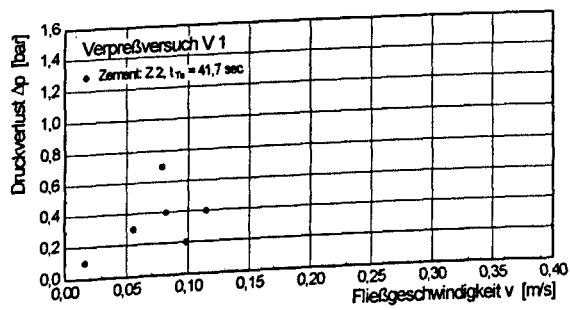
A-6.2

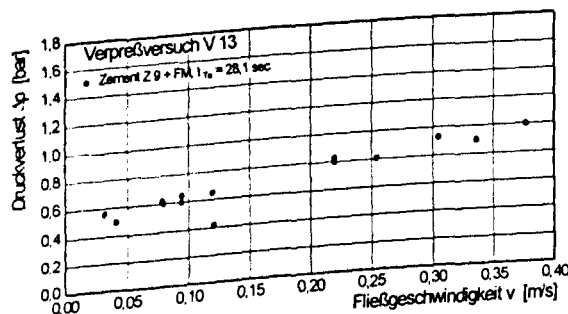
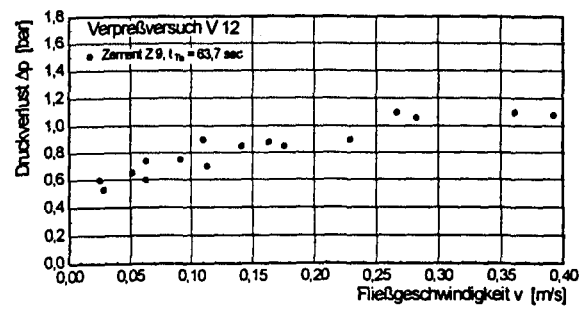
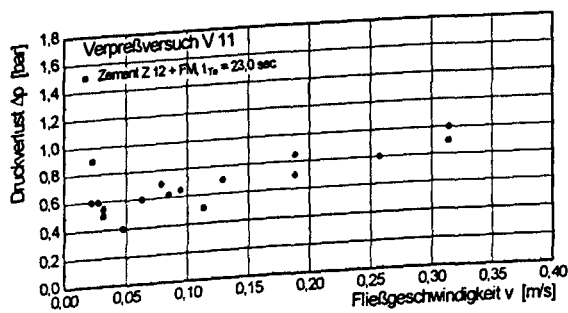
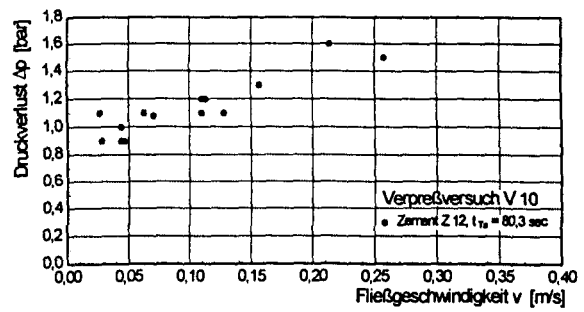
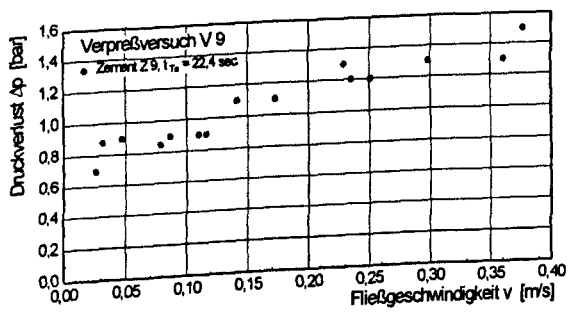


A-6.3

## **Anlagenverzeichnis:      Kapitel 7**

A-7.1	Bilder:	Druckverluste in Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit bei Modellrohren
A-7.2	Tab. und Bilder:	Ergebnisse Baustelle M 1
A-7.3	Tab. und Bilder:	Ergebnisse Baustelle M 2
A-7.4	Tab. und Bilder:	Ergebnisse Baustelle M 3
A-7.5	Tab. und Bilder:	Ergebnisse Baustelle W
A-7.6	Tab. und Bilder:	Ergebnisse Baustelle B
A-7.7	Fotos:	Drahtspannverfahren, nicht vorgespannter Abschnitt
A-7.8	Fotos:	Drahtspannverfahren, Hochpunkt
A-7.9	Fotos:	Drahtspannverfahren, Hochpunkt, Details
A-7.10	Fotos:	Drahtspannverfahren, Wendepunkt, Hoch - Tiefpunkt

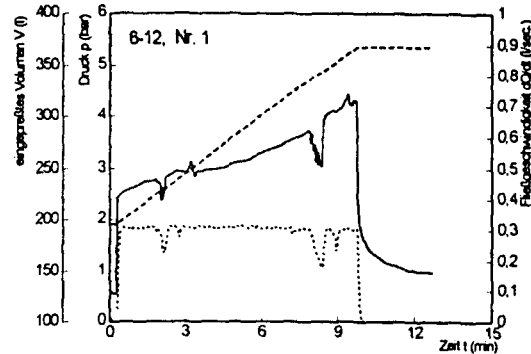
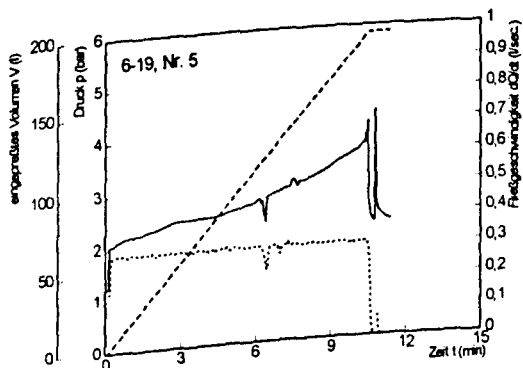
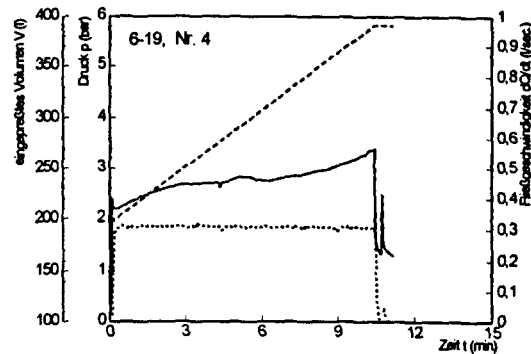
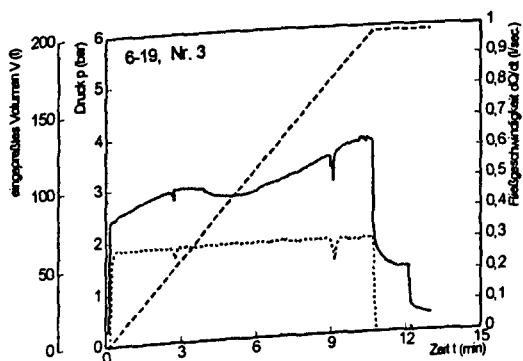
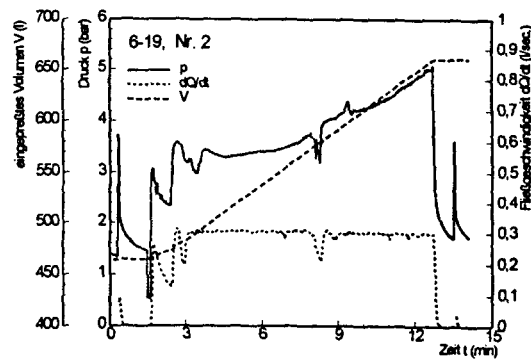
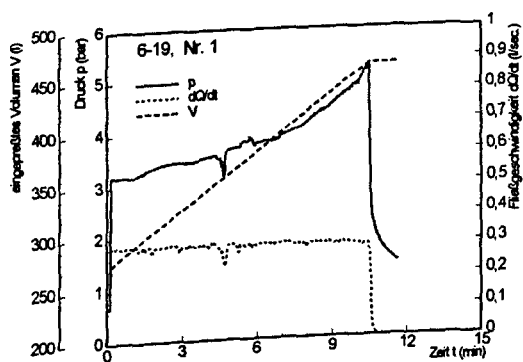






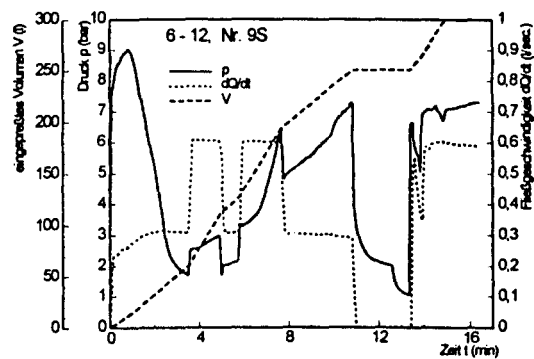
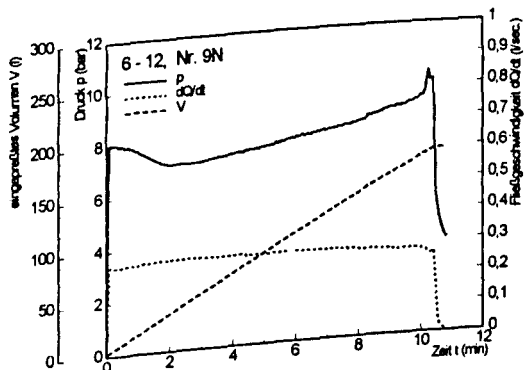
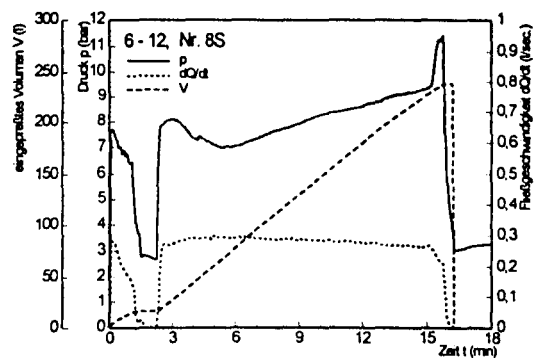
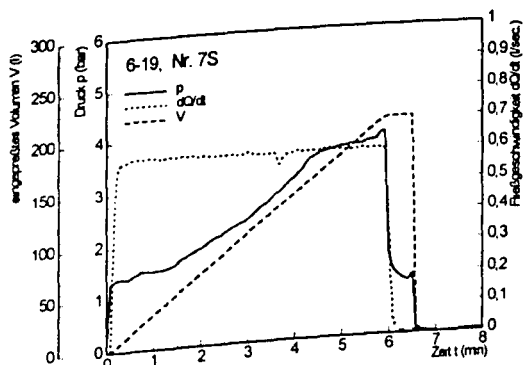
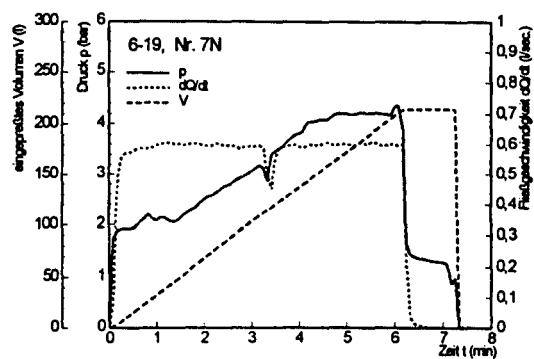
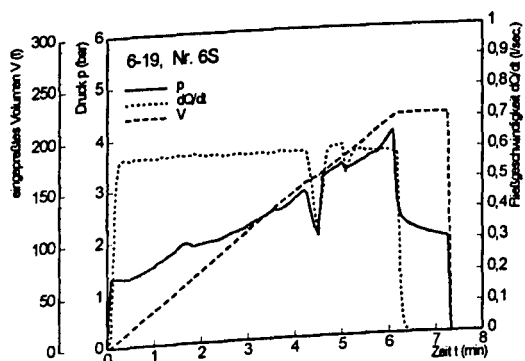
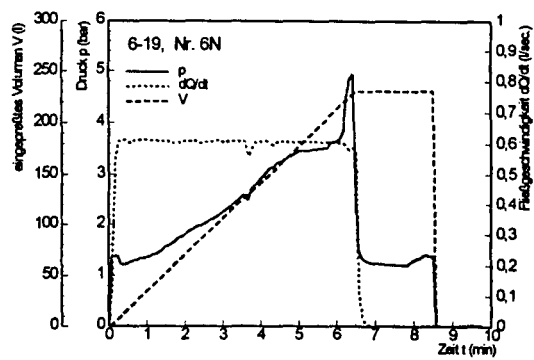
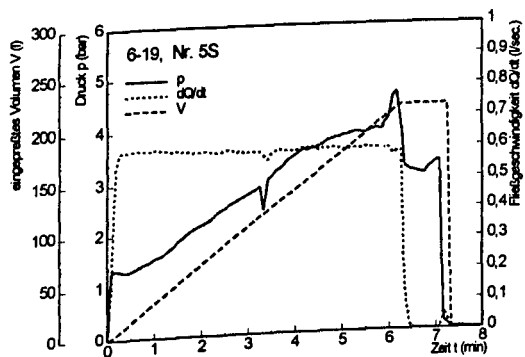
**Anlage A-7.2: Ergebnisse Baustelle M 1**

Nr.	Typ	Länge (m)	Volumen (l/lfm)	cal. Vol. (l)	Durchfluß- volumen (l)	Auslauf- volumen (l)	eingepreßtes Volumen (l)	q <sub>Anf</sub> (l/sec)	q <sub>Ende</sub> (l/sec)	p <sub>Anf</sub> (bar)	p <sub>Ende</sub> (bar)	Δp (bar)	Δp/lfm (bar/m)
1	6-19	44,65	4,13	184,4	197,6	ca. 7,5	190,1	0,30	0,30	3,2	5,2	2,0	0,045
2	6-19	"	"	"	195,4	ca. 5,0	190,4	"	"	3,2	5,0	1,8	0,040
3	6-19	43,70	"	180,5	196,3	ca. 6,0	190,3	"	"	2,4	3,7	1,3	0,030
4	6-19	"	"	"	195,0	ca. 6,0	189,0	"	"	2,2	3,3	1,1	0,025
5	6-19	"	"	"	194,9	ca. 6,0	188,9	"	"	2,0	3,7	1,7	0,039
1	6-12	43,75	3,73	163,2	173,2	ca. 3,5	169,7	"	"	2,4	4,3	1,9	0,043
						Mittel 6-19:	189,7					Mittel 6-19:	0,036



# **Anlage A-7.3:      Ergebnisse Baustelle M 2**

Nr.	Typ	Länge (m)	Volumen (l/lfm)	cal. Vol. (l)	Durchfluß- volumen (l)	Auslauf- volumen (l)	eingepreßtes Volumen (l)	QAnf (l/sec)	QEnde (l/sec)	PAnf (bar)	Pende (bar)	Δp (bar)	Δp/lfm (bar/m)
5 N	6-19	45,41	4,13	187,5	220,7	ca. 12,0	208,7	0,55	0,55	0,60	5,30	4,70	0,104
5 S	6-19	"	"	"	220,1	ca. 12,0	208,1	"	"	1,33	4,10	2,77	0,061
6 N	6-19	"	"	"	230,6	ca. 21,0	209,6	"	"	1,38	4,60	3,22	0,071
6 S	6-19	"	"	"	214,0	ca. 6,0	208,0	"	"	1,35	3,96	2,61	0,057
7 N	6-19	"	"	"	214,5	ca. 6,0	208,5	"	"	1,90	4,30	2,40	0,053
7 S	6-19	"	"	"	210,1	ca. 3,0	207,1	"	"	1,40	3,90	2,50	0,055
8 N	6-12	60,84	3,73	226,9	?		?	"	"	6,90			
8 S	6-12	"	"	"	238,0	ca. 8,0	230,0	0,28	0,28	7,60	11,20	n.b.	
9 N	6-12	"	"	"	178,0	?	?	"	"	8,11	10,10	"	
9 S	6-12	"	"	"	248,5	ca. 18,0	230,5	"	"	7,90	7,30	"	
						Mittel 6-19:	208,3					Mittel 6-19:	0,067

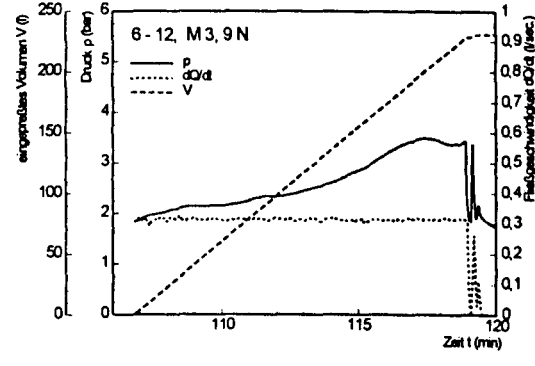
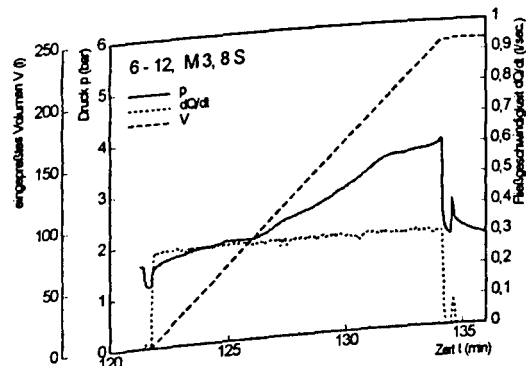
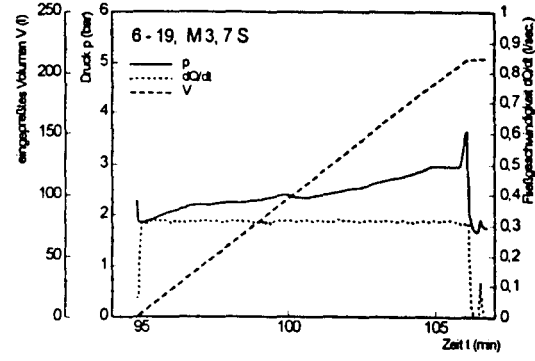
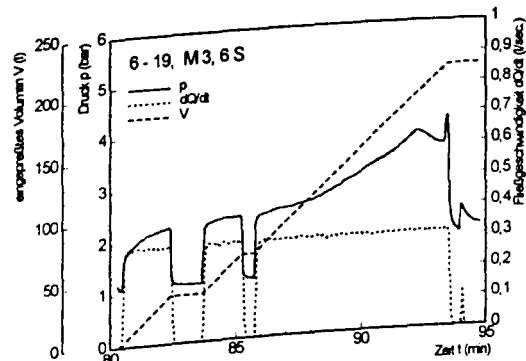
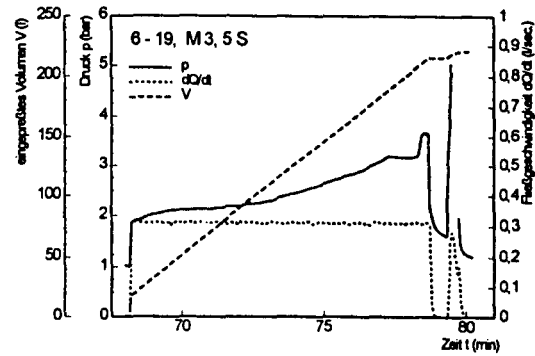
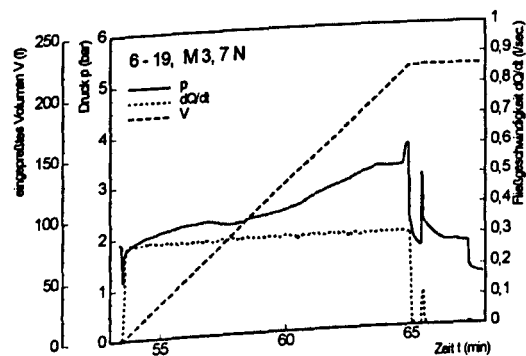
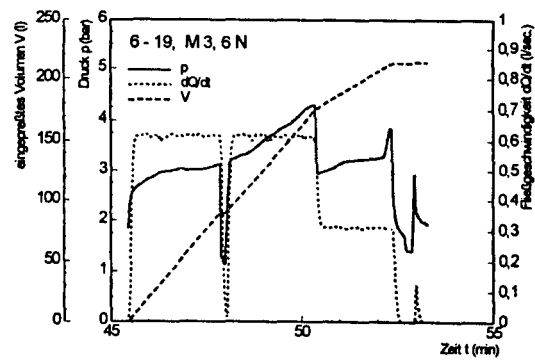
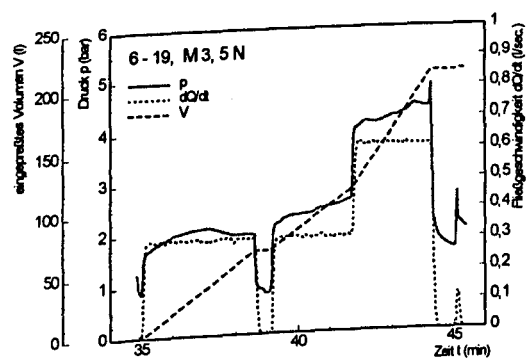


# Anlage A-7.4: Ergebnisse Baustelle M 3

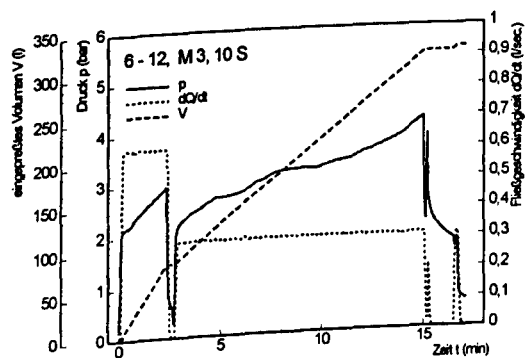
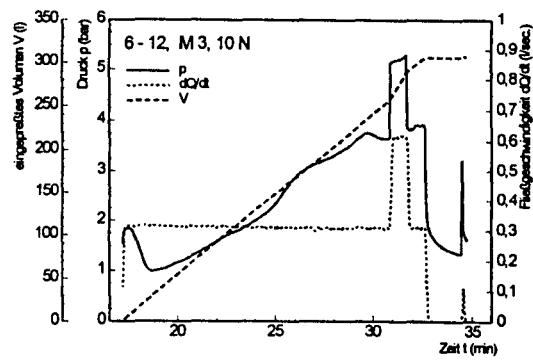
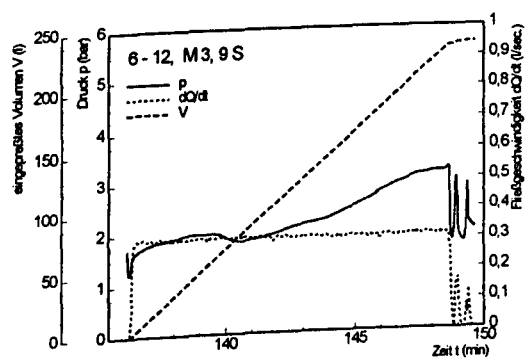
Nr.	Typ	Länge (m)	Volumen (l/lfm)	cal. Vol. (l)	Durchfluß- volumen (l)	Auslauf- volumen (l)	eingepreßtes Volumen (l)	q <sub>Anf</sub> (l/sec)	q <sub>Ende</sub> (l/sec)	p <sub>Anf</sub> (bar)	p <sub>Ende</sub> (bar)	Δp (bar)	Δp/lfm (bar/m)
M 3, 5 N	6-19	45,41	4,13	187,5	211,4	ca. 6,0	205,4	0,30	0,61	1,70	3,10 *	1,40	0,031
M 3, 6 N	6-19	"	"	"	213,2	"	207,2	0,61	0,30	2,40	4,90 **	2,50 **	0,055 **
M 3, 7 N	6-19	"	"	"	215,5	"	209,5	0,30	0,30	1,80	3,15	1,35	0,030
M 3, 5 S	6-19	"	"	"	215,3	"	209,3	"	"	1,90	3,15	1,25	0,028
M 3, 6 S	6-19	"	"	"	214,3	"	208,3	"	"	1,80	3,90	2,10	0,046
M 3, 7 S	6-19	"	"	"	212,7	"	206,7	"	"	1,85	2,95	1,10	0,024
						Mittel 6-19:	207,7					Mittel 6-19:	0,032
Nr.	Typ	Länge (m)	Volumen (l/lfm)	cal. Vol. (l)	Durchfluß- volumen (l)	Auslauf- volumen (l)	eingepreßtes Volumen (l)	q <sub>Anf</sub> (l/sec)	q <sub>Ende</sub> (l/sec)	p <sub>Anf</sub> (bar)	p <sub>Ende</sub> (bar)	Δp (bar)	Δp/lfm (bar/m)
M 3, 8 N	6-12	60,81	3,73	226,9	236,0	ca. 6,0	230,0	0,30	0,30	1,70	3,60	1,90	0,031
M 3, 8 S	6-12	"	"	"	237,0	"	231,0	"	"	1,50	3,55	2,05	0,034
M 3, 9 N	6-12	"	"	"	235,1	"	229,1	"	"	1,80	3,35	1,55	0,025
M 3, 9 S	6-12	"	"	"	234,8	"	228,8	"	"	1,65	3,05	1,40	0,023
						Mittel 6-12:	229,7					Mittel 6-12:	0,028
M 3, 10 N	6-12	80,51	"	300,3	318,4	ca. 10,0	308,4	0,30 / 0,60	0,30 / 0,60	1,00	4,00	3,00	0,037
M 3, 10 S	6-12	"	"	"	311,4	ca. 6,0	305,4	"	"	1,40 *	4,15	2,75	0,034
						Mittel 6-12:	306,9					Mittel 6-12:	0,036

\* bezogen auf dQ/dt = q = 0,30 l/sec. (Werte geschätzt)

\*\* bezogen auf dQ/dt = q = 0,60 l/sec. (Werte geschätzt)



A-7.4



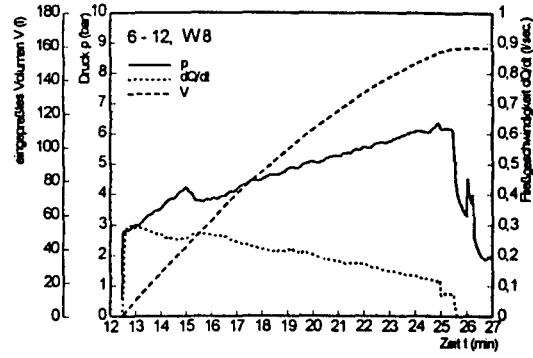
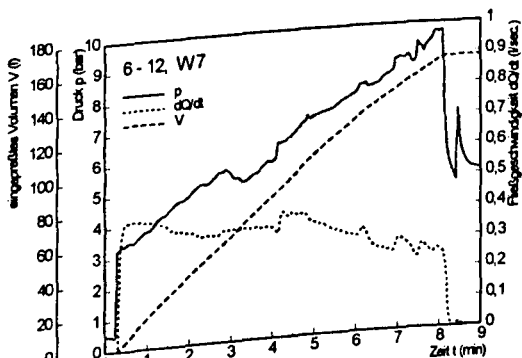
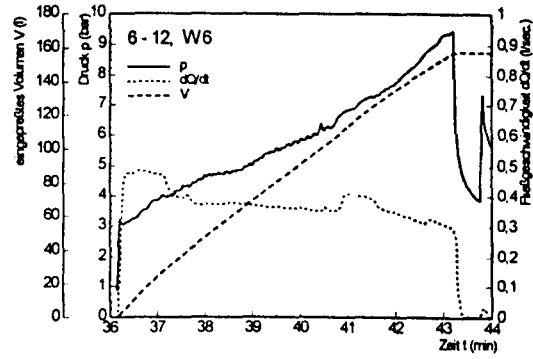
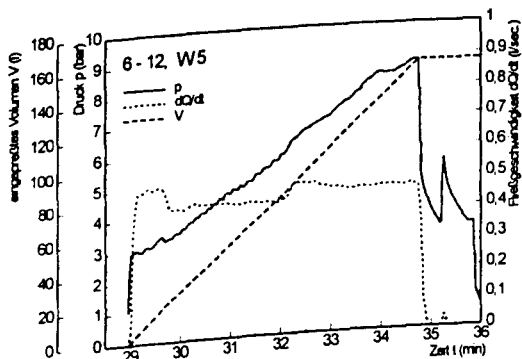
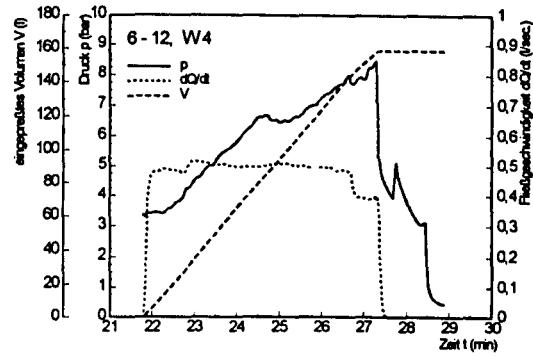
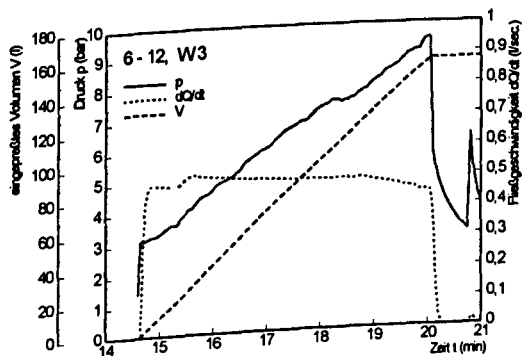
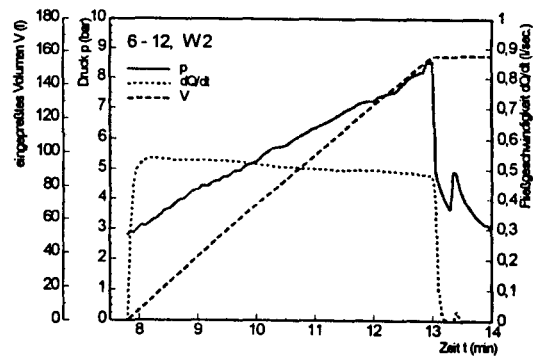
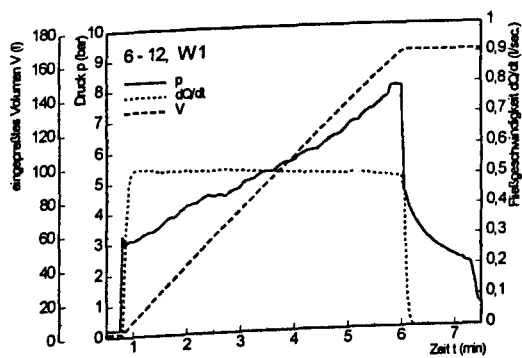
# Anlage A-7.5:      Ergebnisse Baustelle W

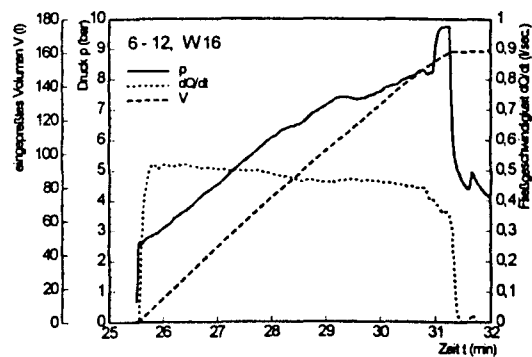
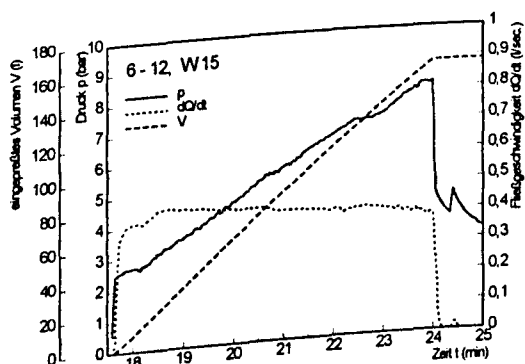
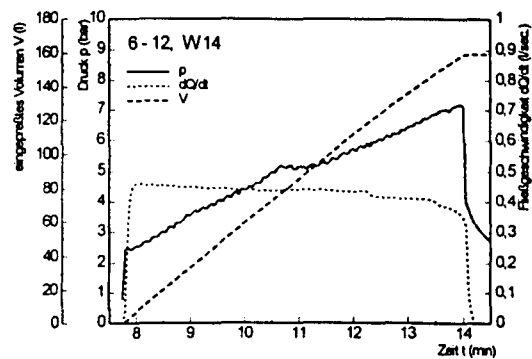
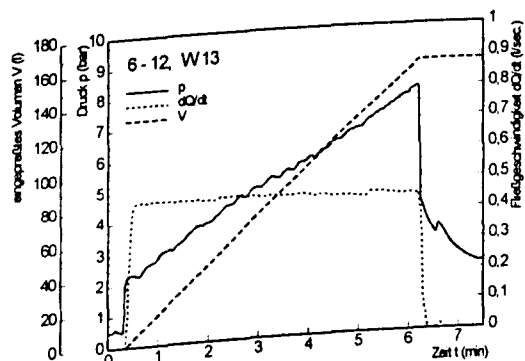
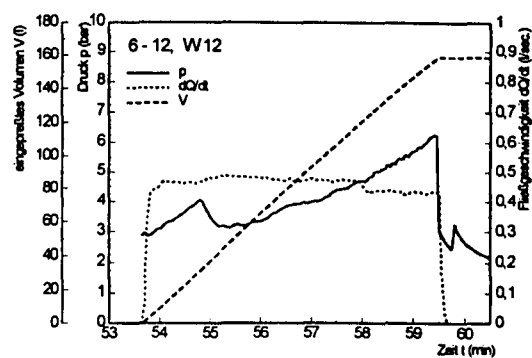
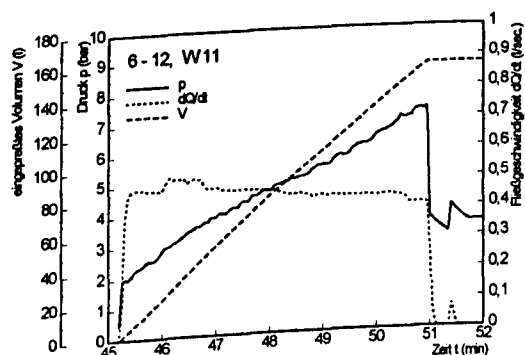
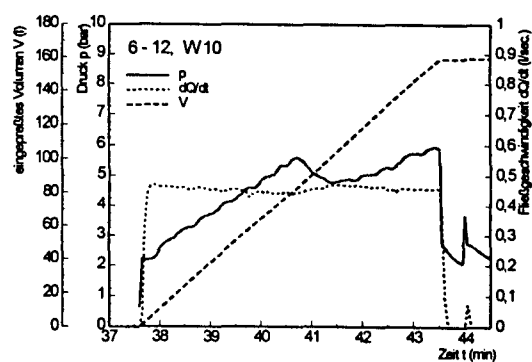
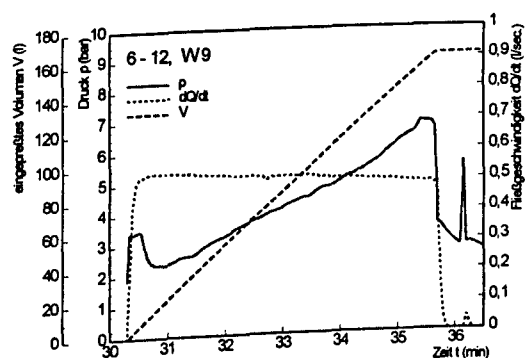
Nr.	Typ	Länge (m)	Volumen (l/lfm)	cal. Vol. (l)	Durchfluß- volumen (l)	Auslauf- volumen (l)	eingepreßtes Volumen (l)	qAnf (l/sec)	qEnde (l/sec)	pAnf (bar)	pEnde (bar)	Δp (bar)	Δp/lfm (bar/m)
1	6-12	50,50	3,025	152,8	164,3	6,0	158,3	0,51	0,50	3,10	7,93	4,83	0,956
2	6-12	"	"	"	157,5	"	151,5	0,51	0,49	2,94	8,56	5,62	0,111
3	6-12	"	"	"	158,1	"	152,1	0,49	0,46	3,23	9,40	6,17	0,122
4	6-12	"	"	"	158,8	"	152,8	0,47	0,40	3,42	8,50	5,08	0,100
5	6-12	"	"	"	158,0	"	152,0	0,50	0,47	3,03	8,78	5,75	0,114
6	6-12	"	"	"	157,9	"	151,9	0,47	0,30	3,07	9,40	6,33	0,125
7	6-12	"	"	"	159,4	"	153,4	0,41	0,25	3,40	9,70	6,30	0,125
8	6-12	"	"	"	158,9	"	152,9	0,30	0,11	2,80	6,20	3,40	0,067
9	6-12	"	"	"	163,7	"	157,7	0,53	0,49	3,40	6,40	3,00	0,059
10	6-12	"	"	"	159,1	"	153,1	0,47	0,46	2,21	5,91	3,70	0,073
11	6-12	"	"	"	157,0	"	151,0	0,49	0,40	2,32	7,20	4,88	0,097
12	6-12	"	"	"	158,7	"	152,7	0,44	0,43	2,93	6,30	3,37	0,067
13	6-12	"	"	"	158,8	"	152,8	0,46	0,45	2,30	7,95	5,65	0,112
14	6-12	"	"	"	159,6	"	153,6	0,46	0,40	2,48	7,10	4,62	0,092
15	6-12	"	"	"	159,2	"	153,2	0,42	0,40	2,50	8,10	5,60	0,111
16	6-12	"	"	"	160,7	"	154,7	0,50	0,37	2,80	9,70	6,90	0,137

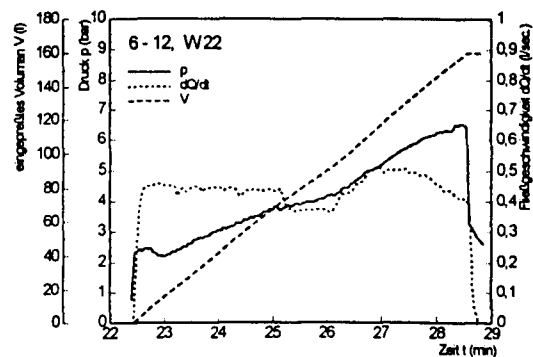
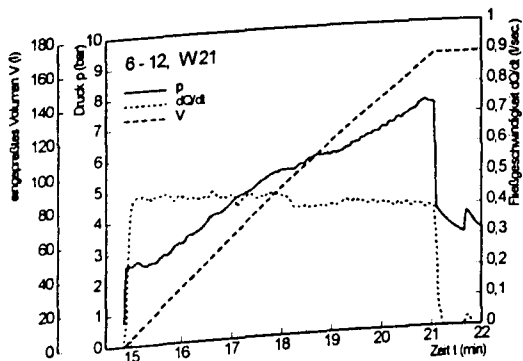
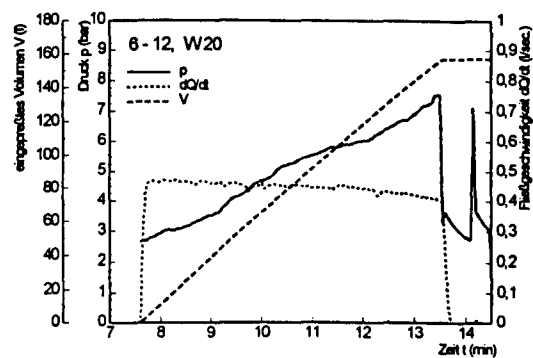
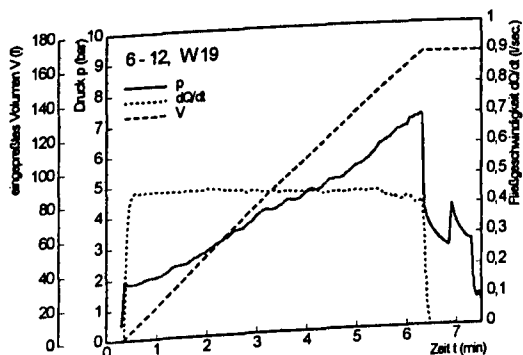
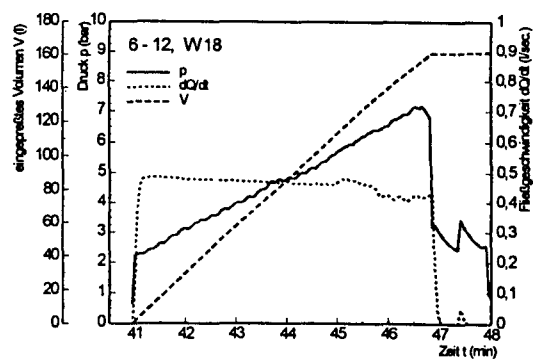
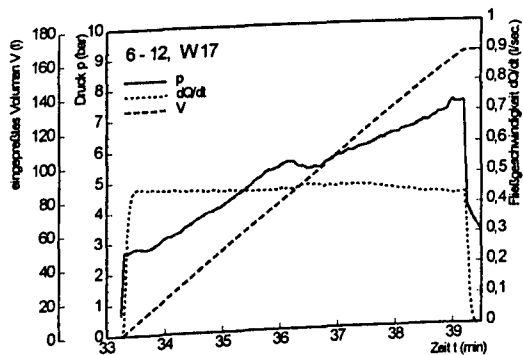


**Anlage A-7.5: Ergebnisse Baustelle W, Fortsetzung**

Nr.	Typ	Länge (m)	Volumen (l/lfm)	cal. Vol. (l)	Durchfluß- volumen (l)	Auslauf- volumen (l)	eingepreßtes Volumen (l)	q <sub>An</sub> (l/sec)	q <sub>Ende</sub> (l/sec)	p <sub>Anf</sub> (bar)	p <sub>Ende</sub> (bar)	Δp (bar)	Δp/lfm (bar/m)
17	6-12	50,50	2,97	150,3	161,6	6,0	155,6	0,48	0,43	2,70	7,32	4,62	0,092
18	6-12	"	"	"	160,9	"	154,9	0,49	0,43	2,28	7,10	4,82	0,096
19	6-12	"	"	"	162,1	"	156,1	0,47	0,40	1,83	7,00	5,17	0,102
20	6-12	"	"	"	157,6	"	151,6	0,46	0,40	2,72	7,58	4,86	0,096
21	6-12	"	"	"	161,1	"	155,1	0,47	0,39	2,60	7,36	4,76	0,094
22	6-12	"	"	"	160,3	"	154,3	0,45	0,41	2,40	6,50	4,10	0,081
						Mittel:	153,7					Mittel:	0,099





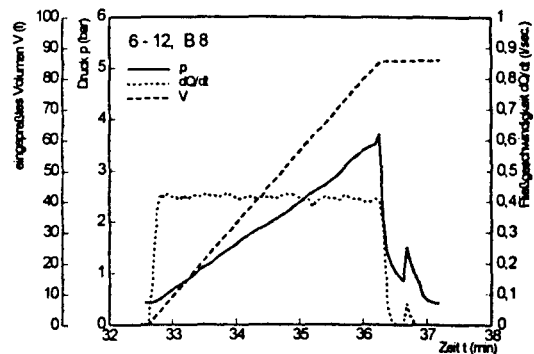
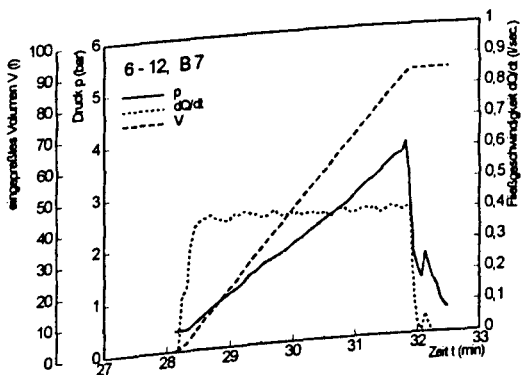
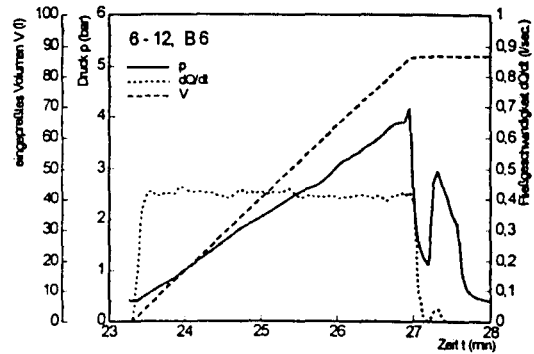
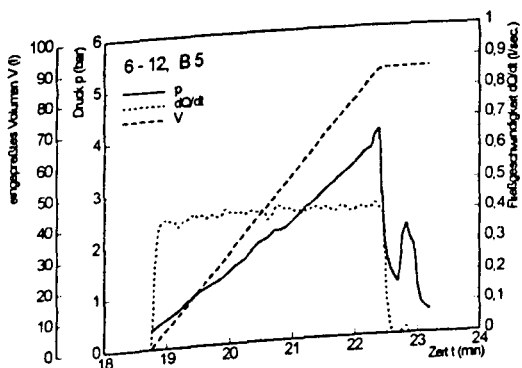
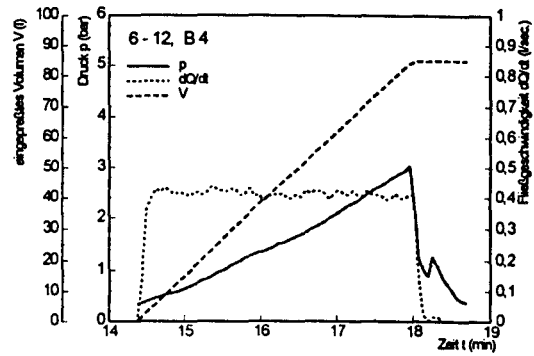
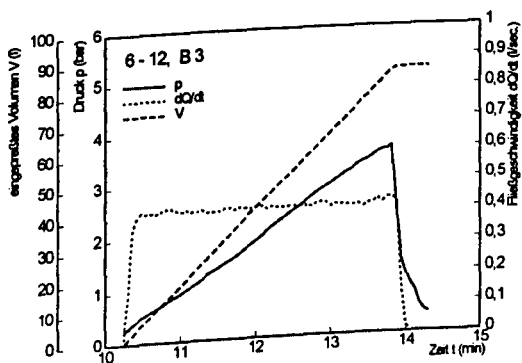
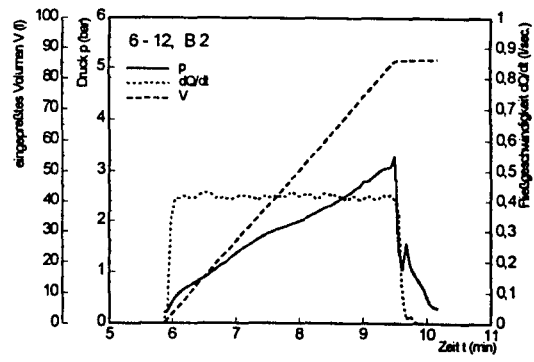
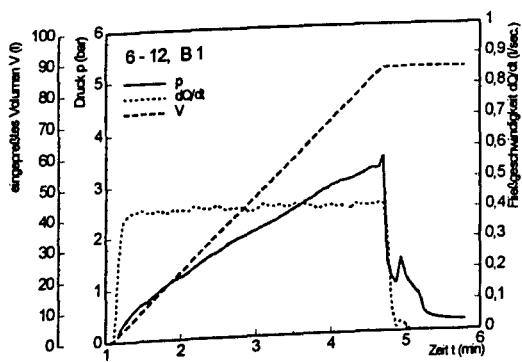


# **Anlage A-7.6:      Ergebnisse Baustelle B**

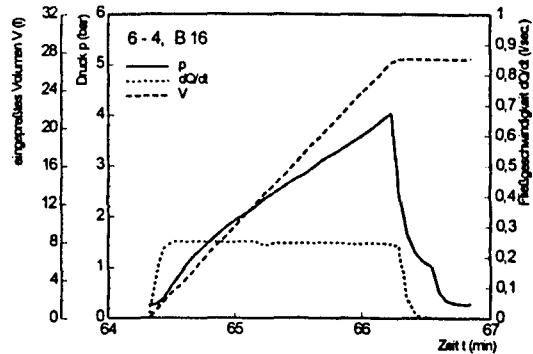
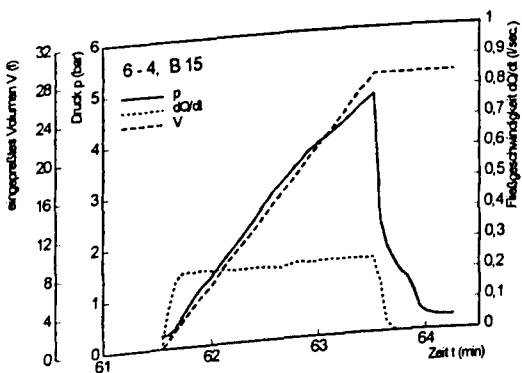
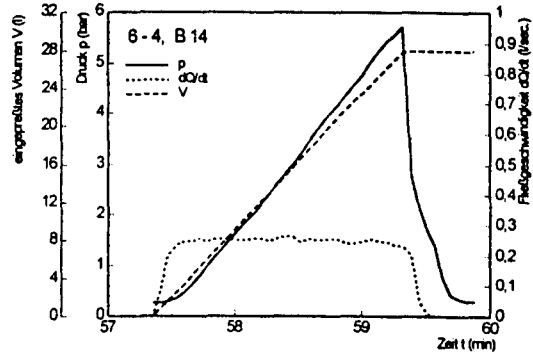
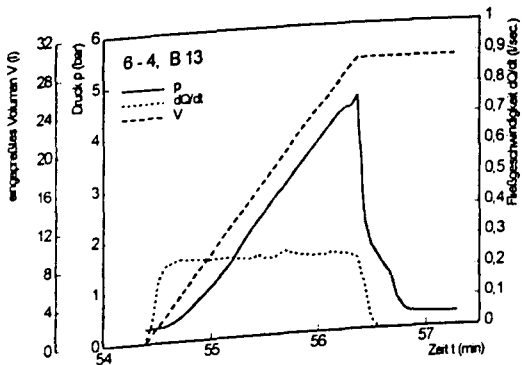
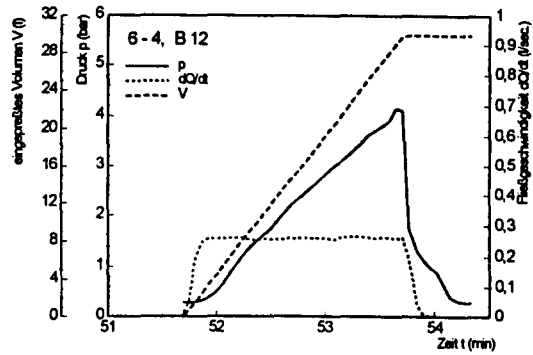
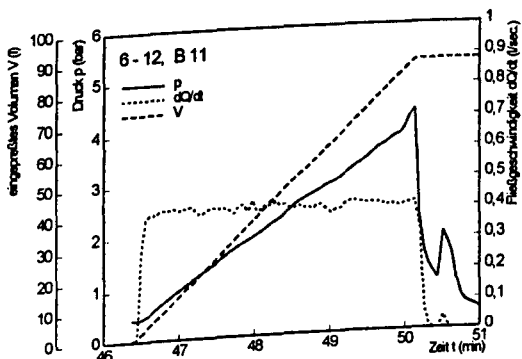
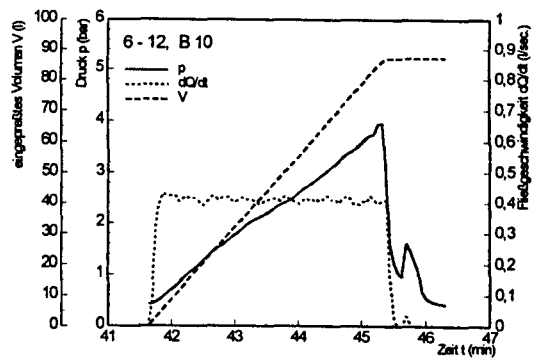
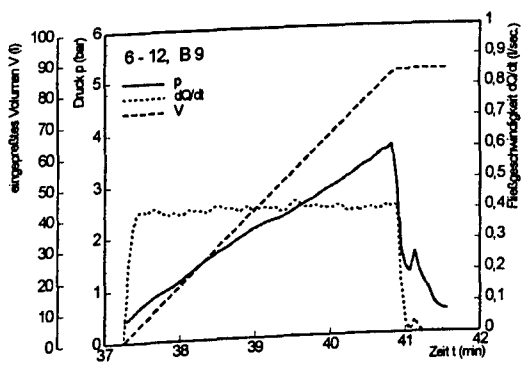
Nr.	Typ	Länge (m)	Volumen (l/fm)	cal. Vol. (l)	Durchfluß- volumen (l)	Auslauf- volumen (l)	eingepreßtes Volumen (l)	qAnf (l/sec)	qEnde (l/sec)	pAnf (bar)	pEnde (bar)	Δp (bar)	Δp/lfm (bar/m)
1	6-12	27,05	3,025	81,8	85,0	1,5	83,5	0,41	0,41	0,56	3,20	2,64	0,098
2	6-12	"	"	"	86,0	"	84,5	0,41	0,42	0,50	3,08	2,58	0,095
3	6-12	"	"	"	86,1	"	84,6	0,41	0,42	0,51	3,65	3,14	0,116
4	6-12	"	"	"	84,8	"	83,3	0,42	0,41	0,52	3,00	2,48	0,092
5	6-12	"	"	"	86,6	"	85,1	0,41	0,41	0,45	3,89	3,44	0,127
6	6-12	"	"	"	86,9	"	85,4	0,42	0,41	0,40	3,90	3,50	0,129
7	6-12	"	"	"	85,5	"	84,0	0,39	0,41	0,50	3,73	3,23	0,119
8	6-12	"	"	"	85,9	"	84,4	0,41	0,40	0,46	3,60	3,14	0,116
9	6-12	"	"	"	85,0	"	83,5	0,41	0,40	0,55	3,66	3,11	0,115
10	6-12	"	"	"	86,9	"	85,4	0,42	0,40	0,60	3,95	3,35	0,124
11	6-12	"	"	"	88,2	"	86,7	0,41	0,41	0,43	4,10	3,67	0,136
						Mittel:	84,6					Mittel:	0,115

**Anlage A-7.6: Ergebnisse Baustelle B, Fortsetzung**

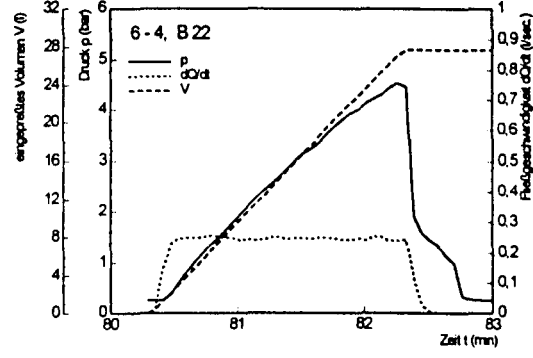
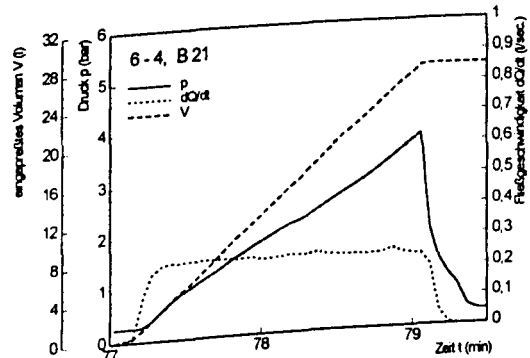
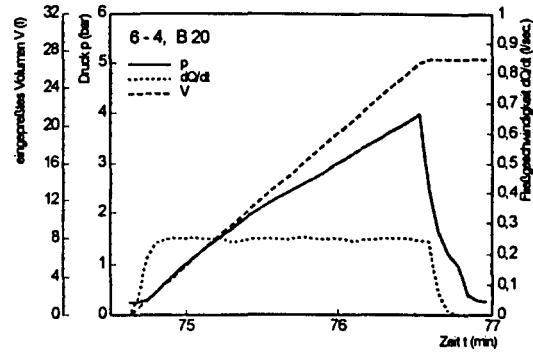
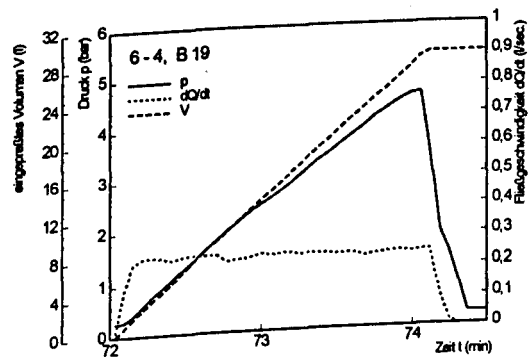
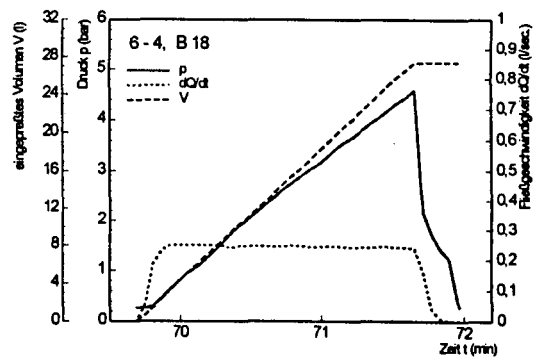
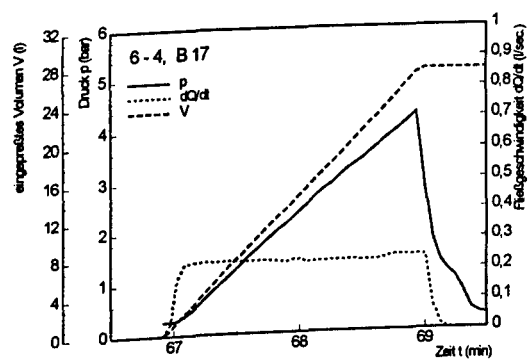
Nr.	Typ	Länge (m)	Volumen (l/lfm)	cal. Vol. (l)	Durchfluß- volumen (l)	Auslauf- volumen (l)	eingepreßtes Volumen (l)	qAnf (l/sec)	qEnde (l/sec)	pAnf (bar)	pEnde (bar)	Δp (bar)	Δp/lfm (bar/m)
1	6-4	23,0	1,212	27,9	29,9	0,5	29,4	0,25	0,26	0,38	4,11	3,73	0,155
2	6-4	"	"	"	28,4	"	27,9	0,26	0,24	0,35	4,58	4,23	0,176
3	6-4	"	"	"	28,0	"	27,5	0,24	0,23	0,35	5,73	5,38	0,224
4	6-4	"	"	"	27,1	"	26,6	0,24	0,24	0,38	4,65	4,27	0,178
5	6-4	"	"	"	27,7	"	27,2	0,24	0,25	0,41	4,06	3,65	0,152
6	6-4	"	"	"	27,5	"	27,0	0,23	0,24	0,38	4,29	3,91	0,163
7	6-4	"	"	"	27,4	"	26,9	0,25	0,24	0,31	4,58	4,27	0,178
8	6-4	"	"	"	29,2	"	28,7	0,25	0,25	0,58	4,60	4,02	0,168
9	6-4	"	"	"	27,1	"	26,6	0,25	0,24	0,60	4,00	3,40	0,142
10	6-4	"	"	"	27,3	"	25,8	0,24	0,24	0,40	3,74	3,34	0,139
11	6-4	"	"	"	27,8	"	26,3	0,25	0,24	0,45	4,55	4,10	0,171
						Mittel:	27,3					Mittel:	0,168

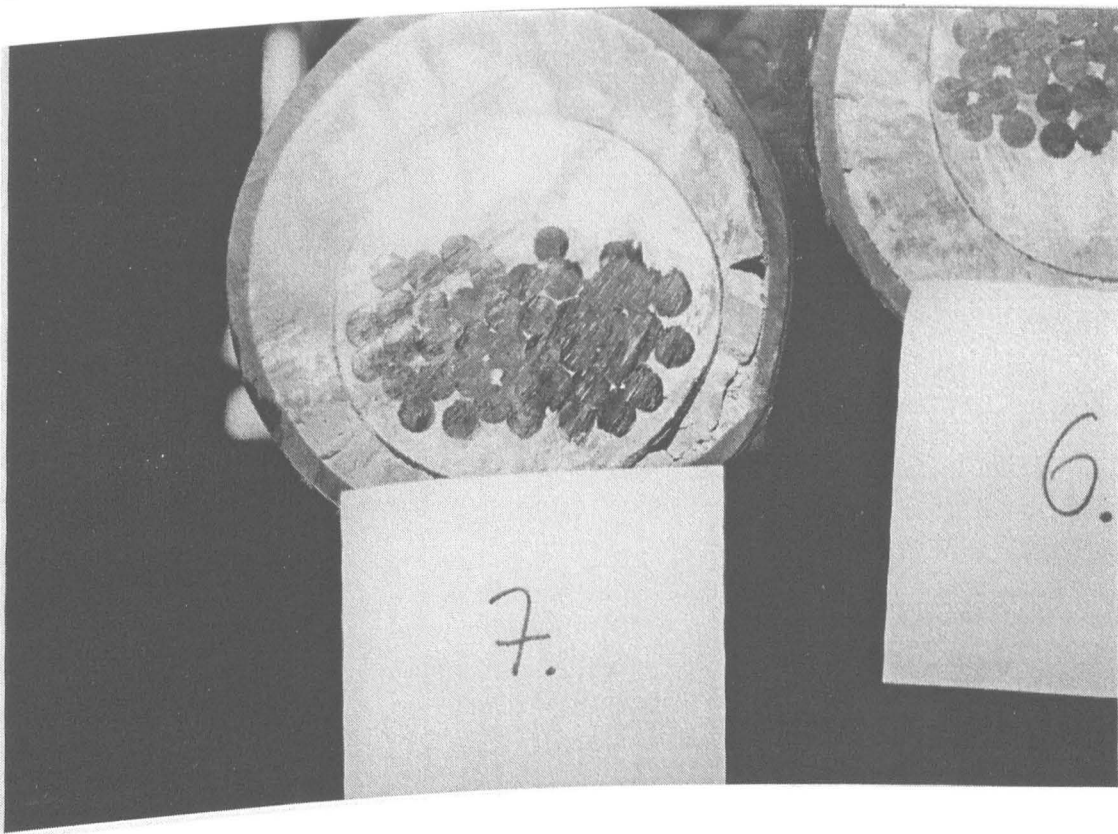
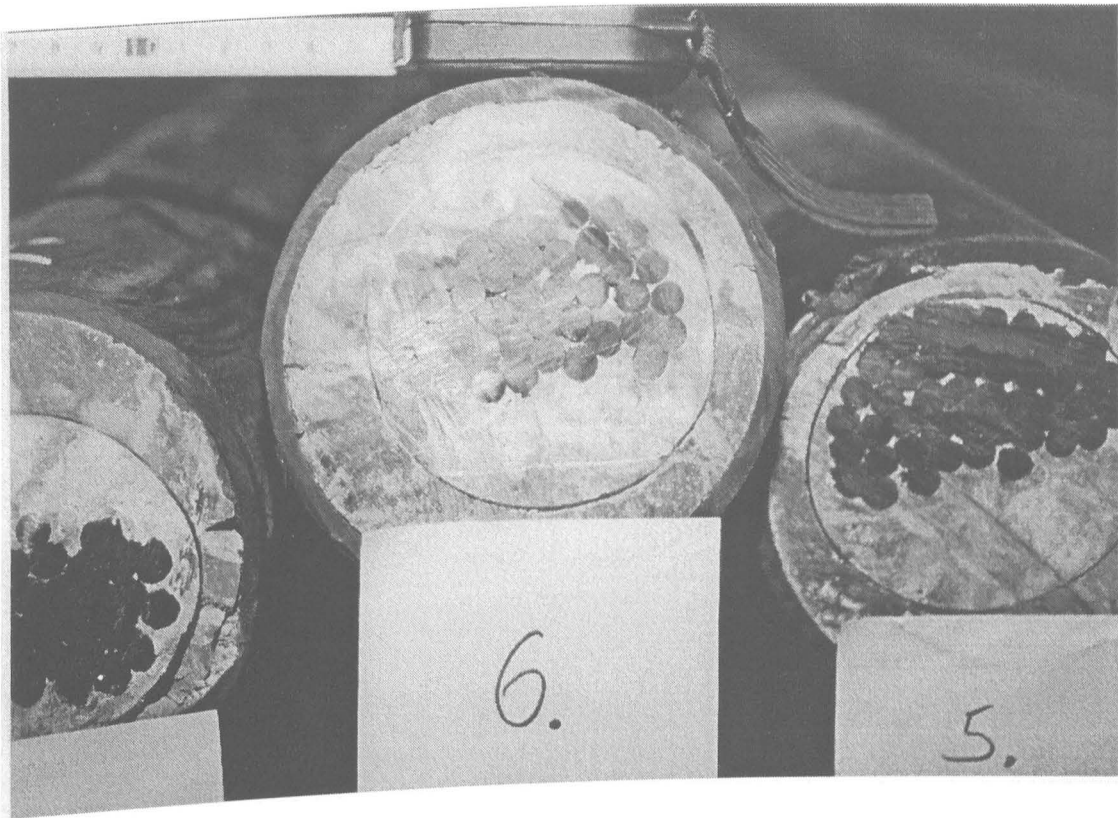


### A-7.6

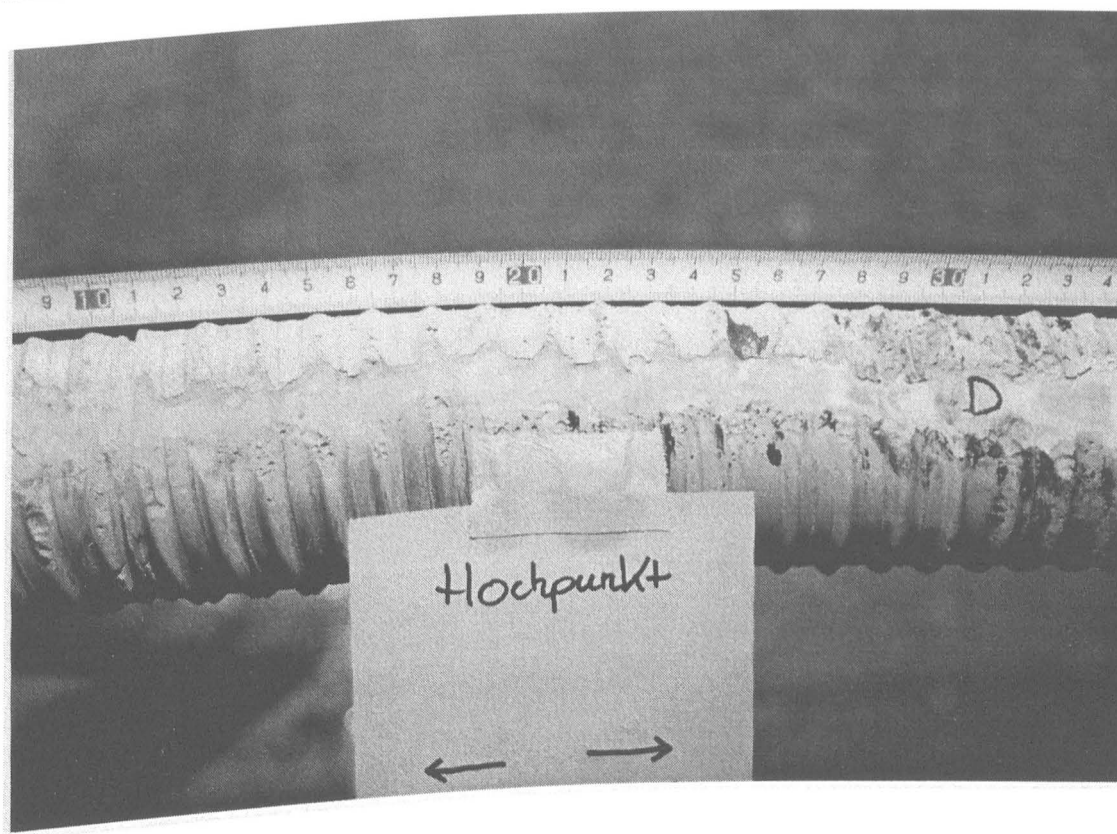
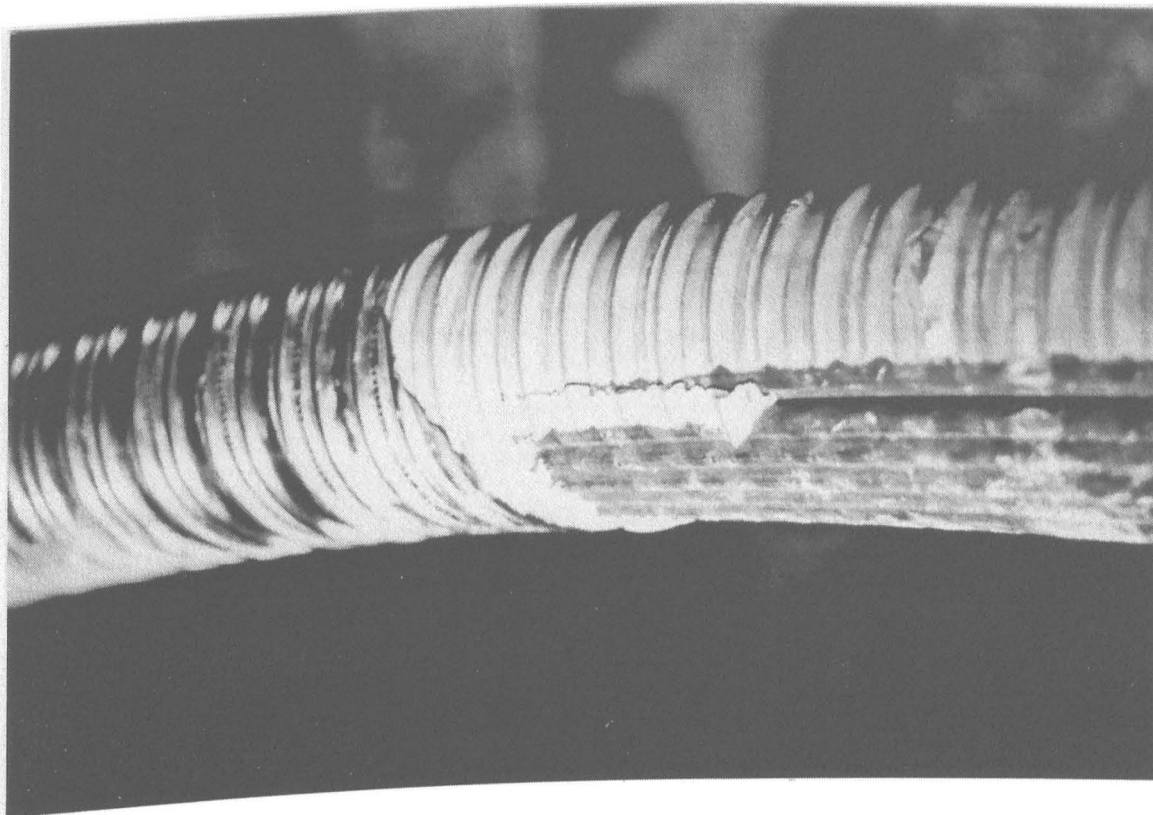




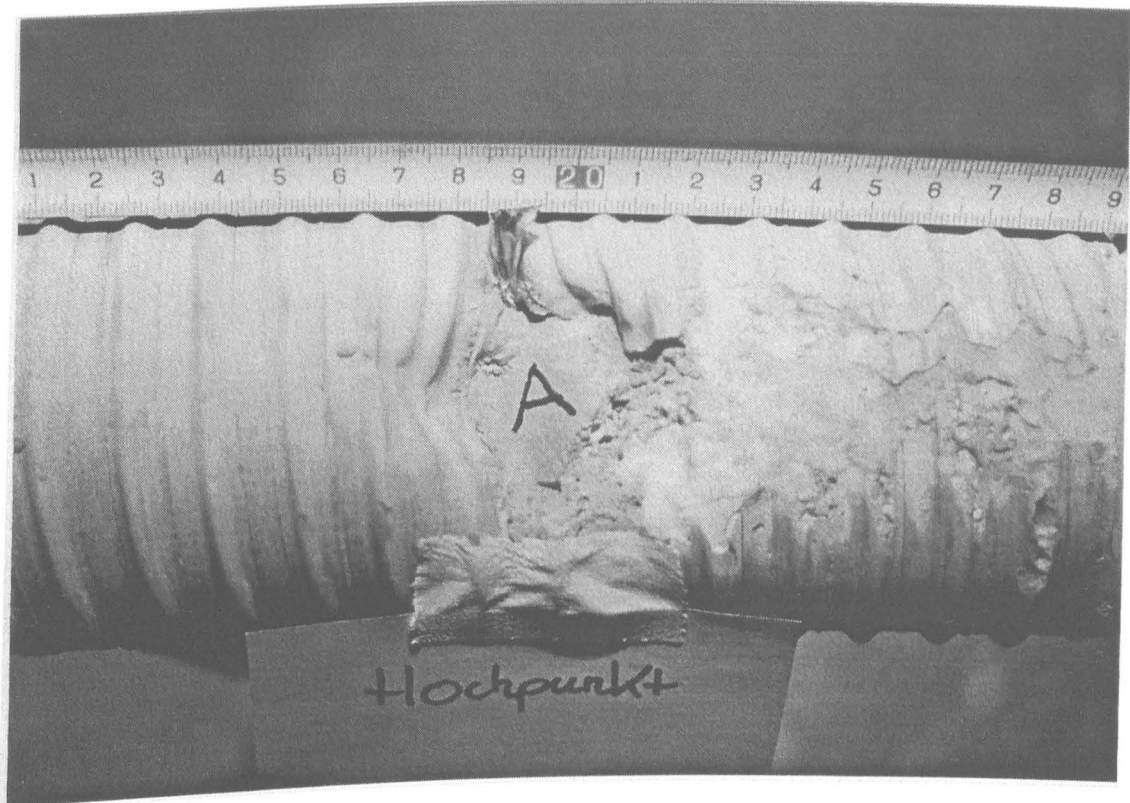




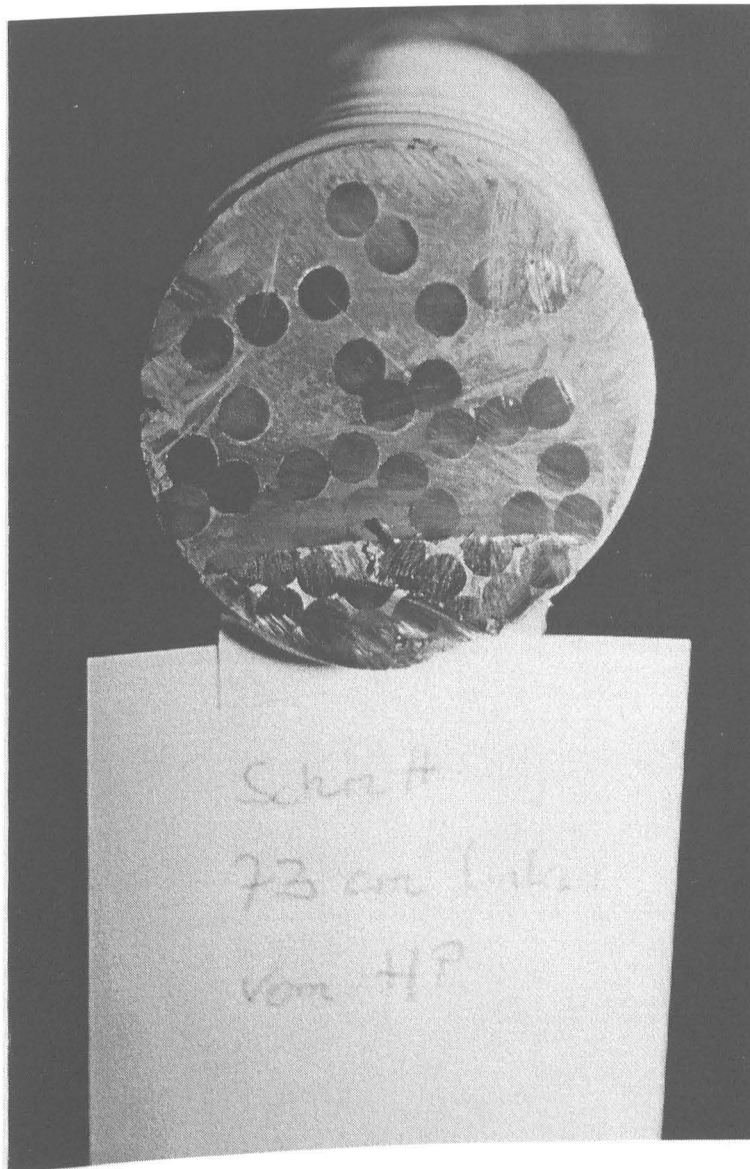
A-7.7



A-7.8



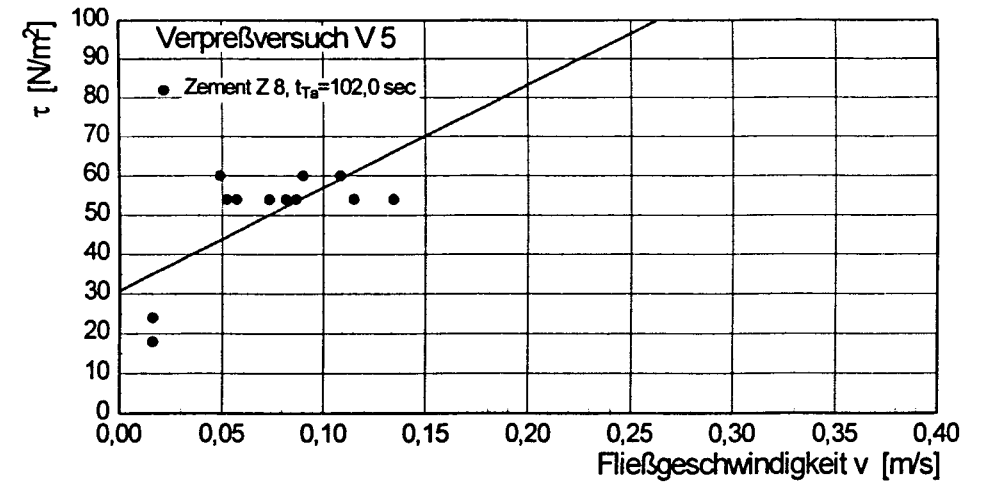
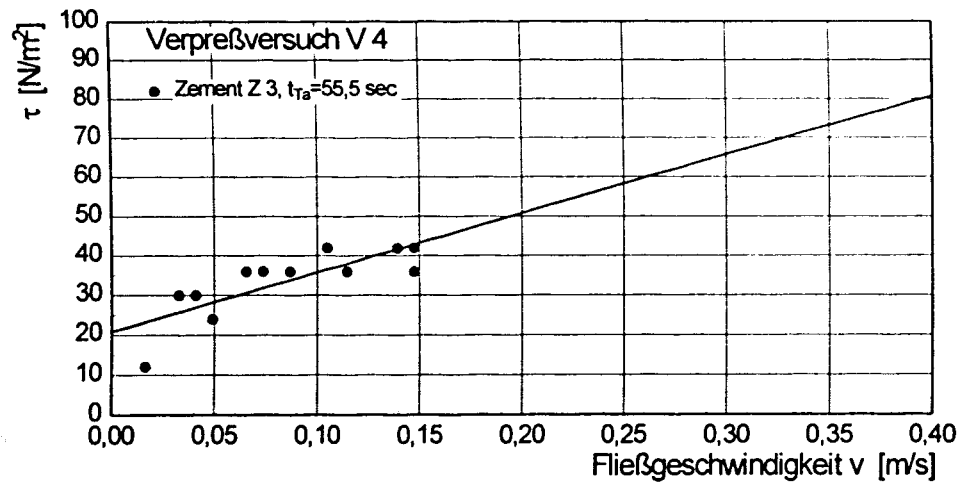
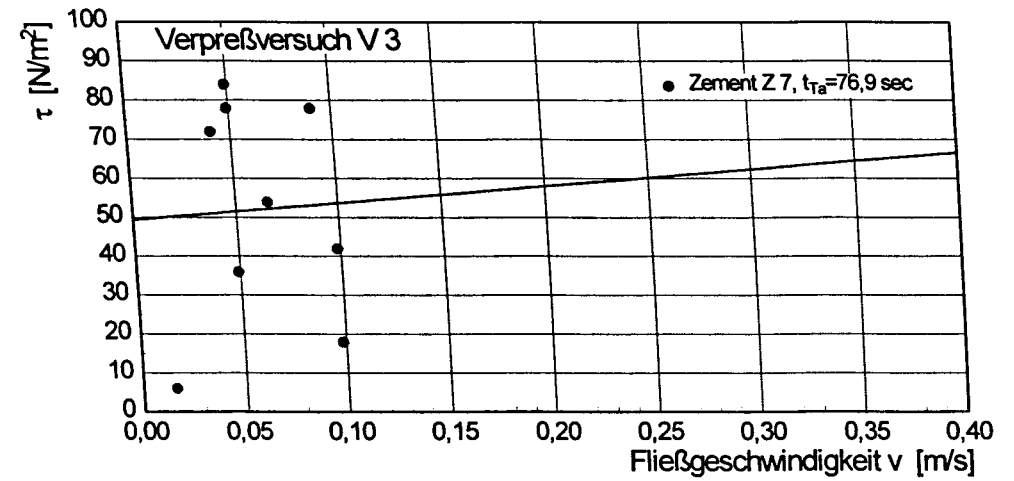
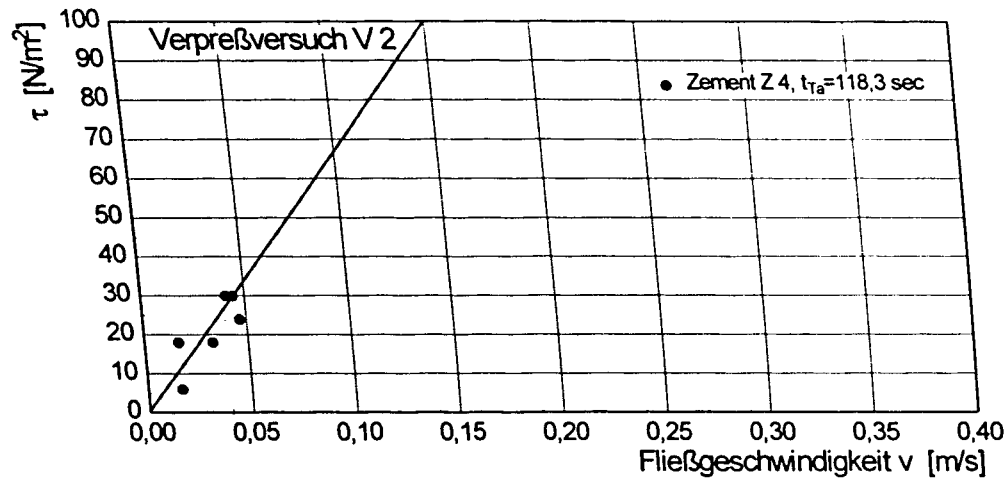
A-7.9

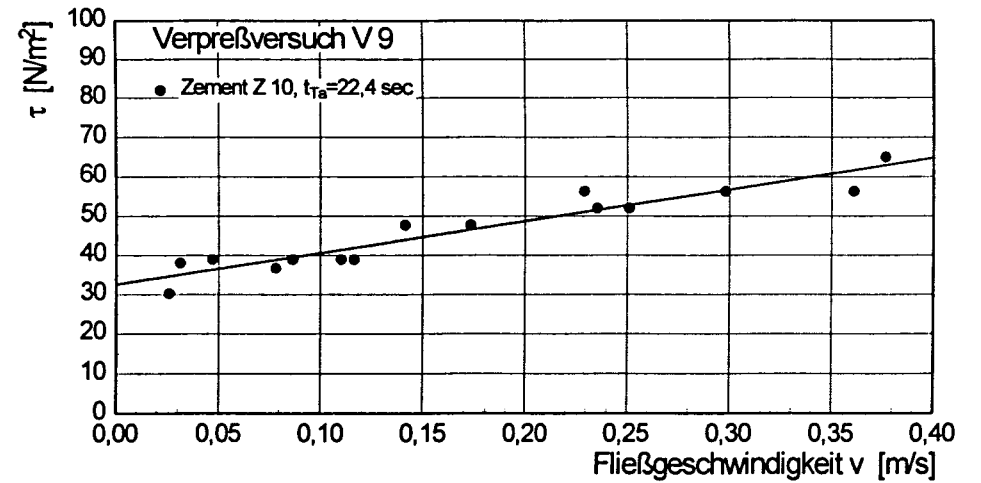
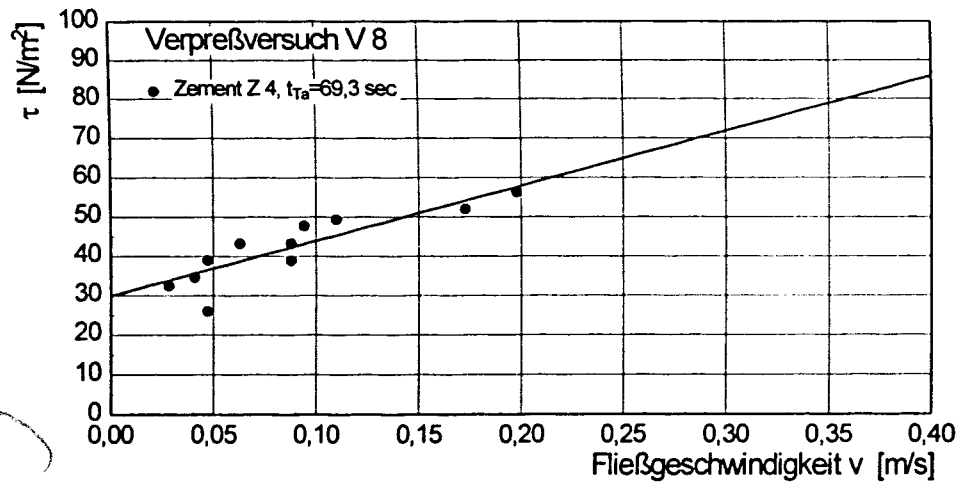
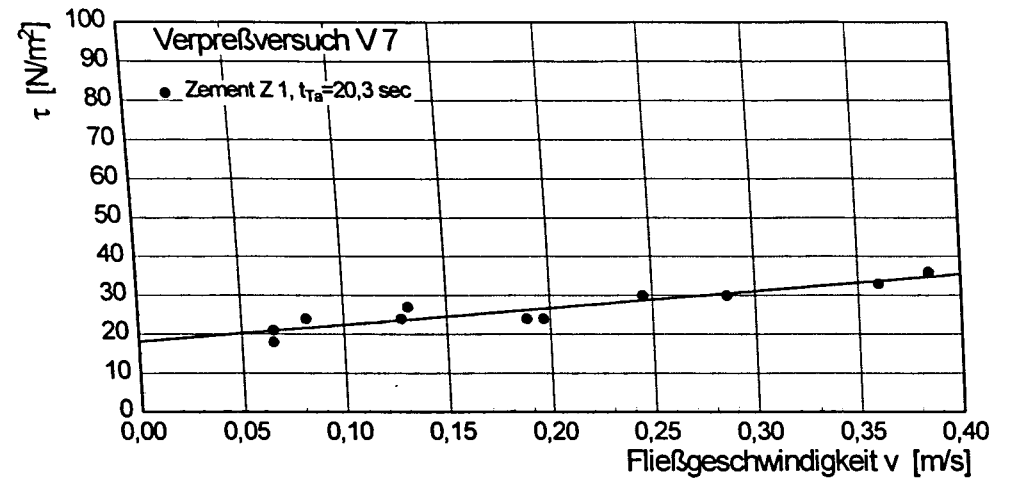
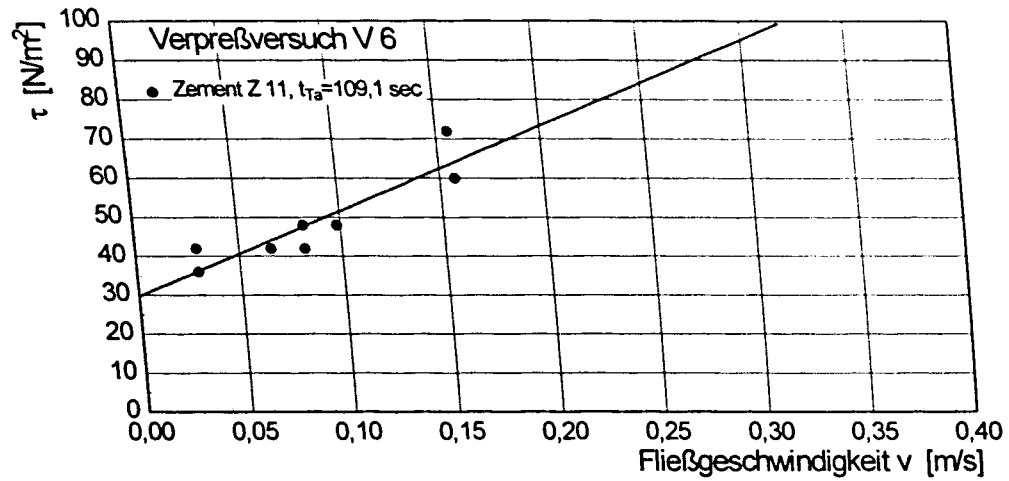


A-7.10

**Anlagenverzeichnis:      Kapitel 8**

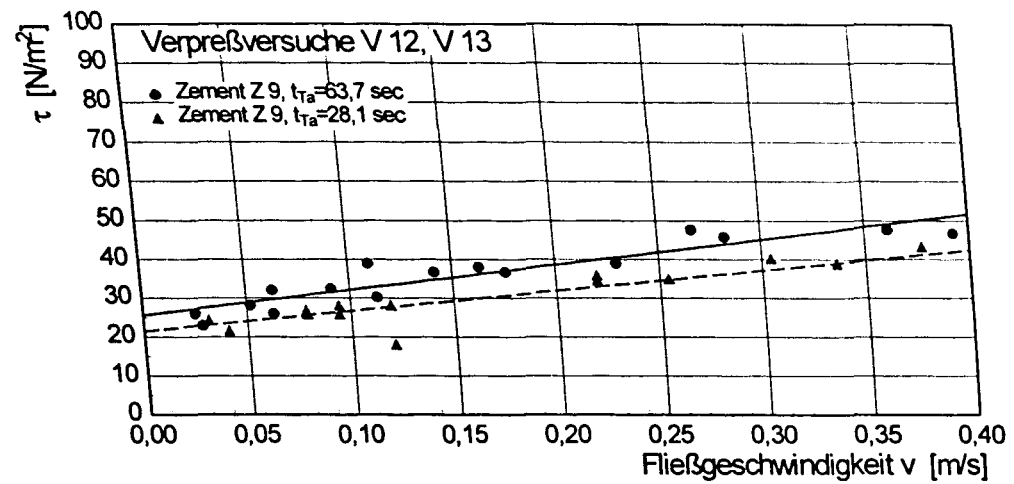
- A-8.1      Bilder:      Schubspannung in Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit anhand der Versuchsergebnisse mit Modellrohren
- A-8.2      Bilder:      Scheinbare Viskosität in Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit anhand der Versuchsergebnisse mit Modellrohren





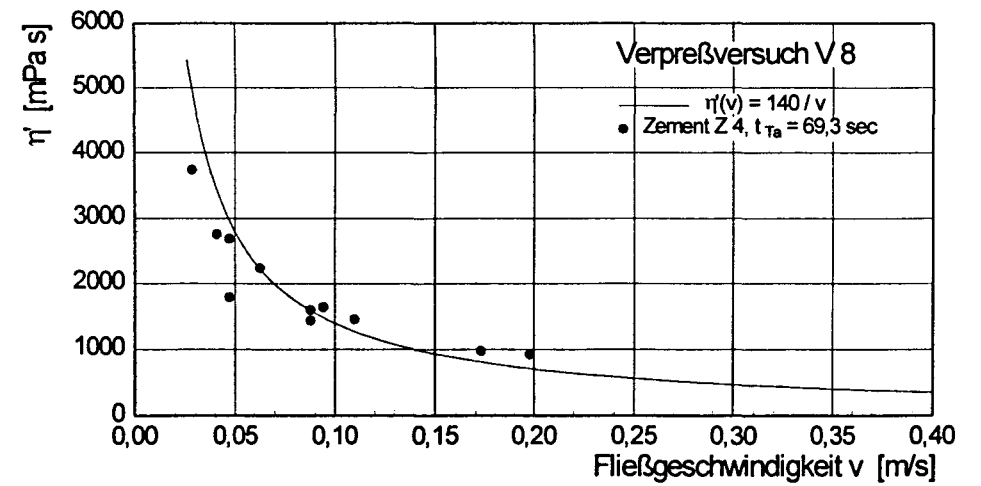
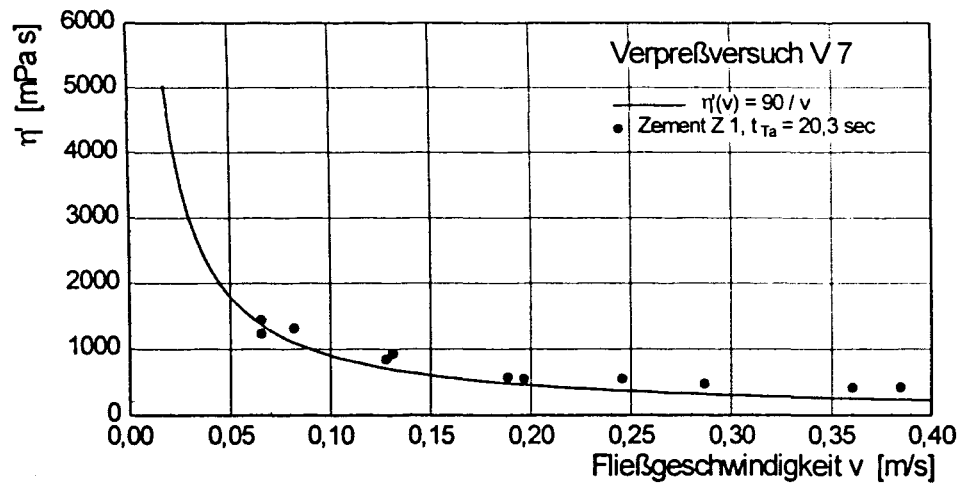
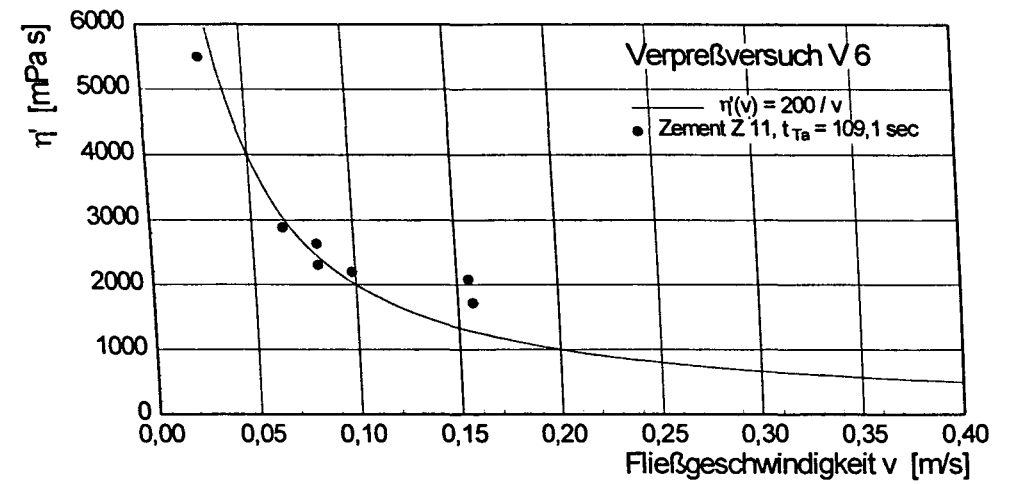
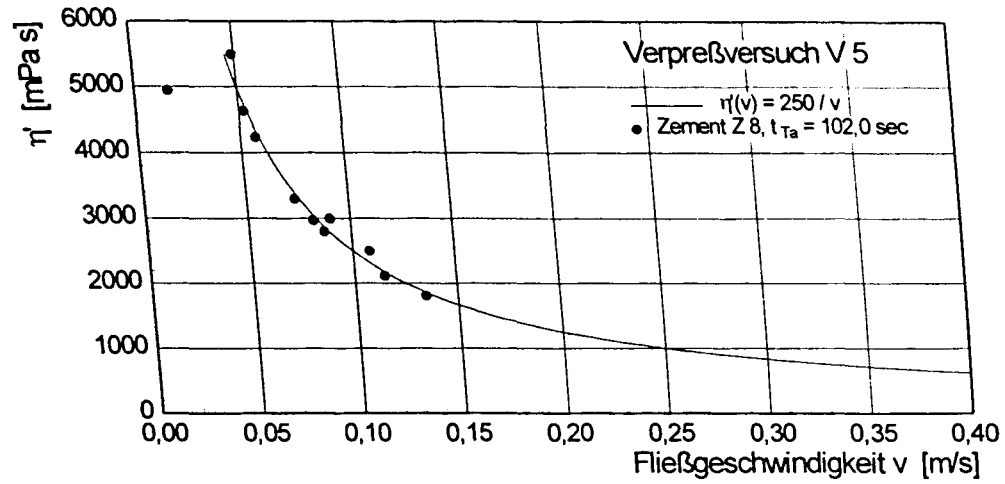
A-8.1



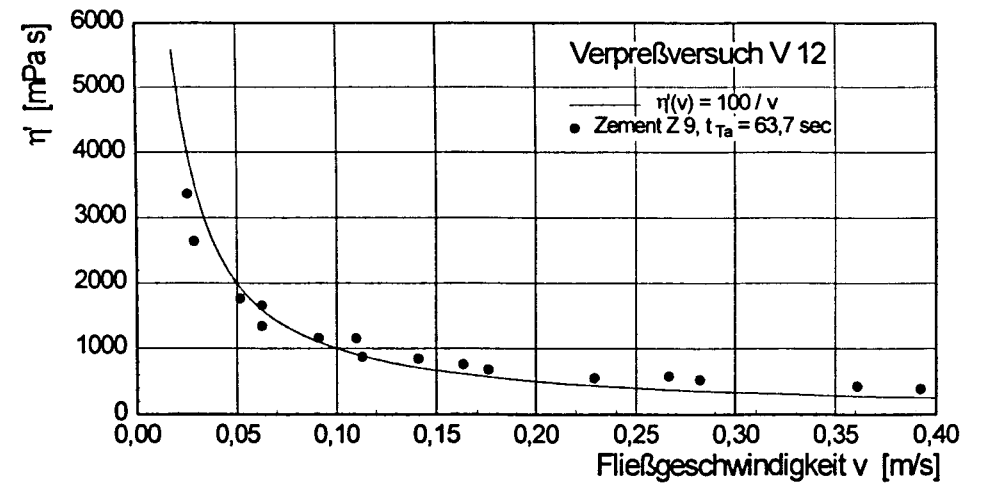
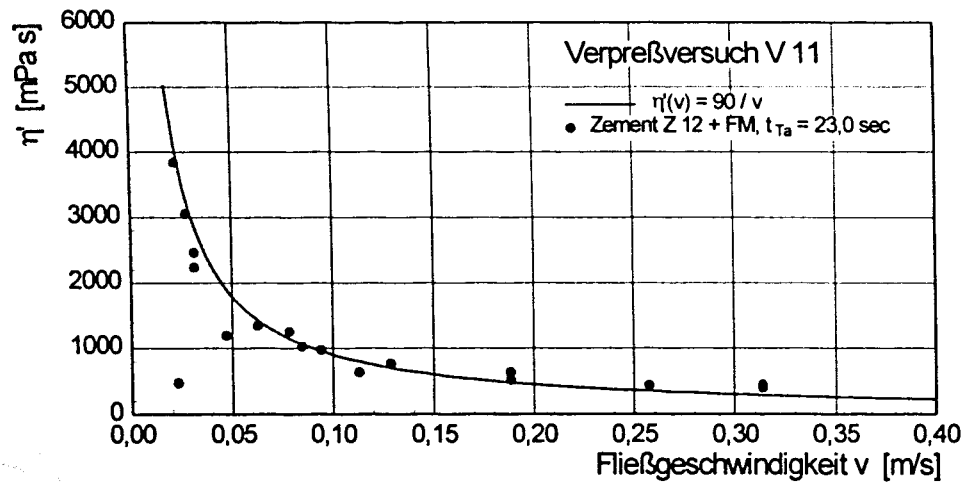
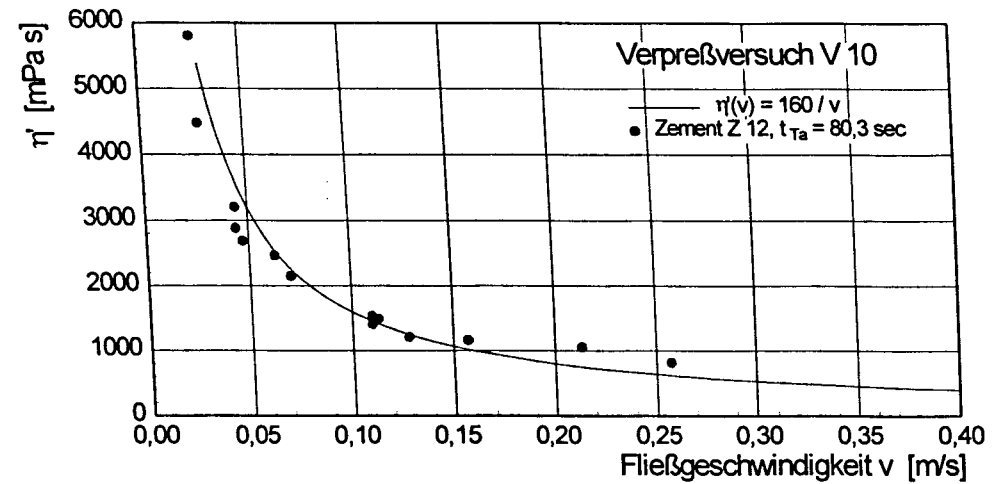
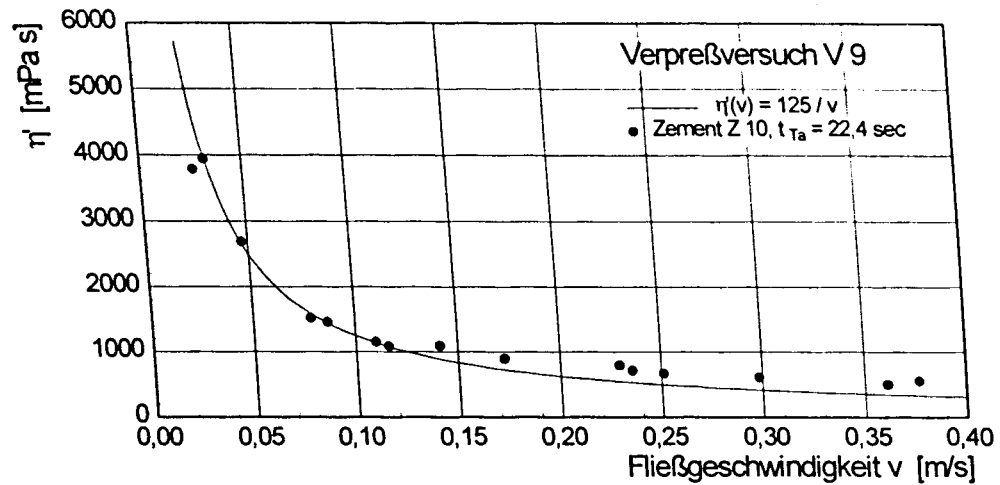


A-8.1





A-8.2



A-8.2

